

66501

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YATAY BORULAR İÇİNDE AKMAKTA OLAN SOĞUTUCU AKIŞKANIN
BUHARLAŞMASI ESNASINDA ISI TAŞINIM KATSAYISININ
DEĞİŞİMİNİN ÇEŞİTLİ PARAMETRELERE GÖRE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Günhan KAYTAZ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Ocak 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 23 Ocak 1997

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Alpin Kemal DAĞSÖZ

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. A. Nilüfer EĞRİCAN

Doç. Dr. Feridun ÖZGÜC

5.3.1997

Ocak 1997

İ.İ. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
MÜHÜRÜ

ÖNSÖZ

Bu tezde, yatay boru içinde buharlaşarak akmakta olan soğutucu akışkanlarda ısı taşınım katsayısının çeşitli fiziksel parametrelere göre değişimi incelenerek bir bağıntı ile ifade edilmesine çalışılmıştır.

Üzerinde incelemenin yapıldığı veri grupları, daha önceden bu konuyla ilgili yapılmış bulunan çalışmalar ve bu teze temel teşkil eden deneylerin sonuçlarından seçilmiştir.

Konu ile ilgili olarak yeterli sayıda teorik çalışma yapılmamış olmasının yarattığı boşluğu bir ölçüde doldurmak üzere oldukça kapsamlı olarak ele alınabilecek olan bu konu, gerek çalışmanın boyutlarını ve gerekse de süresini makul sınırlar içinde tutmak amacıyla sadece ısı taşınım katsayısıyla ilişkili kısımları kullanılarak kısaltılma yoluna gidilmiştir.

Çalışma sonucunda elde edilen ifadeler ve kullanılan veri grupları ayrı ayrı bölümler halinde tezin son bölümünde sunulmuştur.

Olumlu sonuçların elde edildiği ve mevcut bulunan bir boşluğu dolduracağına inandığım bu çalışmanın başlangıcından sonuna kadar her türlü desteği ve yardımı esirgemeyen tez danışmanım ve değerli hocam Prof. Dr. Alpin Kemal DAĞSÖZ'e ve tezimi hazırlamaktaki yardımlarından dolayı meslektaşım Mak. Y. Müh. Aylin YENİLMEZ'e şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

İstanbul, Ocak 1997

Günhan KAYTAZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 GENEL BİLGİLER	3
BÖLÜM 3 BUHARLAŞMA TEORİSİNE KISA BİR BAKİŞ	6
BÖLÜM 4 İKİ FAZLI AKIŞLAR	14
BÖLÜM 5 SOĞUTUCU AKIŞKANLAR	16
BÖLÜM 6 ISI GEÇİŞİNDE TEMEL KAVRAMLAR	18
BÖLÜM 7 ISI TAŞINIMINA ETKİ EDEN PARAMETRELER	20
BÖLÜM 8 TEZE KONU OLAN PROBLEM	22
BÖLÜM 9 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	23
BÖLÜM 10 ÇALIŞMANIN AMACI, YAPISI VE SINIRLARI	29
BÖLÜM 11 ADI GEÇEN YÖNTEMLERİN TANITIMI	32
BÖLÜM 12 SEÇİLEN YÖNTEMİN UYGULAMASI	37
BÖLÜM 13 SONUÇLAR VE İRDELEME	40

BÖLÜM 14 ÖNERİLER	41
KAYNAKLAR	43
EKLER	44
EK A Yöntemlerin ayrıntılı incelemesi	45
EK B Seçilen yöntemin irdelemesi	59
EK C Veriler	60
EK D Sonuçlar	64
EK E Grafikler	68
ÖZGEÇMİŞ	81



SEMBOL LİSTESİ

c_p	: Özgöl ısı [$\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$]
d	: Boru iç çapı [m]
G	: Akışkan debisi [kg/h]
h	: Isı taşınım katsayısı [$\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$]
k	: Isı iletim katsayısı [$\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$]
Nu	: Nusselt sayısı [-]
Pr	: Prandtl sayısı [-]
q	: Sisteme uygulanan ısı akısı [$\text{kcal/m}^2\text{h}$]
r	: Gizli ısı [kcal/kg]
Re	: Reynolds sayısı [-]
t	: Akışkanın doyma sıcaklığı [$^\circ\text{C}$]
v	: Özgöl hacim [m^3/kg]
x	: Akışkanın kuruluk derecesi [-]

Grek sembolleri

α	: Isı yayılım katsayısı [m^2/s]
η	: Dinamik viskozite [kps/m^2]
ν	: Kinematik viskozite [m^2/s]
ρ	: Yoğunluk [kg/m^3]
θ	: Sıcaklık [$^\circ\text{C}$]

İndisler

a	: Akışkana ait
b	: Buhar
d	: Doyma
$eş$	: Eşdeğer
s	: Sıvı
y	: Yüzeye ait

ŞEKİL LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1	Buharlaşma olayında $h-(\theta_y-\theta_a)$ değişimi	9
Şekil 3.2	Buharlaşma olayında akış şekilleri	11
Şekil 7.1	Buharlaşma esnasında $h-x$ ve $h-\theta$ değişimleri	21
Şekil 9.1	Debi-ısı taşınım katsayısı değişimi	27
Şekil 9.2	Kuruluk derecesi-ısı taşınım katsayısı değişimi	27
Şekil 9.3	Isı akısı-ısı taşınım katsayısı değişimi	28

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 5.1 Freon 11'in fiziksel özellikleri	18
Tablo Ek C 1 Veriler	60
Tablo Ek D 2 Sonuçlar	64
Tablo Ek E Grafikler	68



ÖZET

Dairesel kesitli yatay borular içinde buharlaşarak akmakta olan bir soğutucu akışkanın söz konusu olduğu hallerde ısı taşınım katsayısının çeşitli parametrelere göre nasıl değiştiğinin incelendiği bu çalışmada, önceden yapılmış deney sonuçları veri olarak kullanılmış ve nümerik yöntemler yardımıyla bir teori üretmede yararlı olabilecek ampirik ifadeler elde edilmeye çalışılmıştır.

Deney sonuçları, ampirik ifadelerin elde edilmesinde faydalanılan bilgisayar rutinlerine uygun hale getirilmek için önce boyutsuzlaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar da boyutsuz olmakla birlikte kolayca fiziksel büyüklükler cinsinden ifade edilebilmektedir.

Verileri değerlendirerek bağıntıyı elde etmek için 50 farklı matematiksel metod ayrı ayrı incelenerek bunlardan en uygun ve olayın fiziksel yanını en iyi yansıtan bağıntı tercih edilmiştir.

Deney ve hesap sonucu bulunan değerler birbirleri ile karşılaştırıldıktan sonra hem veriler ve hem de sonuçlar birer tablo halinde çalışmaya eklenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, matematiksel açıdan değil, fiziksel açıdan konuyu en iyi yansıtan tipte bağıntılar kullanılarak bulunduğu için, sapmalar açısından ancak belirli sınırlar içerisinde kalmıştır.

Sonuçların irdelendiği bölümde, bu çalışma sırasında dikkate alınan diğer noktalar üzerinde durulmuş ve bunların etkisinin ne yönde olup nasıl hesaplanacağına dair önerilerde bulunulmuştur.

Genel olarak elde edilen sonuç tatminkar bulunmuştur.

SUMMARY

In this study "The change of heat convection coefficient with certain parameters in evaporating flow of refrigerants in horizontal tubes", the general heat convection coefficient has been considered as the function of certain physical and thermodynamical parameters in case of a refrigerant-flow with evaporation.

A simple computer program and various numerical methods were used in order to characterize the situation best. Both the program and methods were obtained from various books and papers.

The numerical methods, 50 different and unique equations, were gathered from mathematical books which are designed especially for engineering and curve-fitting applications.

The computer program was an ordinary Microsoft Windows based program which runs on a personal computer.

All data used for input for the program were taken from the paper of Chawla [1]. The experiments resulting these data were done by Chawla and given as tables within that study.

In order to be able to use the data best, the variables were non-dimensionalized and rearranged.

The experiments assumed the variables to be the vapor quality (in this study as x), the mass flow rate of the refrigerant (in this study as G), the heat flux or average load of the heater area (in this study as q), the inner diameter of the tube (in this study as d) and the saturation temperature of the refrigerant (in this study as t).

As far as known, the vapor quality does not have a unit.

The mass flow rate was given in $\text{kg}(\text{refr.})/\text{h}$. For convenience this unit was rearranged to $\text{kg}(\text{refr.})/\text{m}^2\text{h}$.

Average load of the heater area or the heat flux was given in terms of $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$.

The inner diameter of the tube was given in mm, which was not satisfactory to meet the non-dimensionalization process. Thus, this unit was converted to m.

Finally, the saturation temperature of the refrigerant 11 was given in terms of $^{\circ}\text{C}$.

The results obtained using these variables all were the average heat convection coefficients (in this study as h), which was measured in $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$.

Although some of the units mentioned above are replaced by their up-to-date versions, such as Watts and Kelvin, these are left as-is, since they are still allowed.

As mentioned above, all data were non-dimensionalized and rearranged in order to simplify the calculations. For example, the heat flux

data were used after having been multiplied by the diameter of the tube and divided by the average heat conduction coefficient of the liquid phase of the refrigerant and the saturation temperature. That is,

$$q \Rightarrow \frac{qd}{kt} \quad (1)$$

Similarly, the mass flow rate data of the refrigerant were used after having been divided by a certain mass flow rate, i.e.

$$G \Rightarrow \frac{G}{G_o} \quad (2)$$

There was no need to non-dimensionalize the vapor quality since this variable was already non-dimensional. Therefore, the data of vapor quality were used as-is.

The use of data without any dimension resulted to non-dimensional heat convection coefficients. As far as known from heat transfer, the results are Nusselt numbers.

Nusselt number can simply be described as

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (3)$$

Using the parameters defined above, the Nusselt number can be given as a function of the vapor quality, flow rate of the refrigerant, inner diameter of the tube, saturation temperature of the refrigerant and the applied heat flux.

That is,

$$Nu = f(x, G, d, t_s, q) \quad (4)$$

Here, the diameter should be considered as the hydraulic diameter of the tube. Note that this equation is fairly general and applicable to any tube with any form of cross-sectional area. In spite of this, the diameter has to be the same value as the inner diameter of the tube.

The heat conduction coefficient, which appears in the denominator has to be the heat conduction coefficient of the media filling the tube completely.

Since the evaporating refrigerant did have two phases, namely a liquid phase and a vapor phase, the heat conduction coefficient of the media had to be calculated specially for this case.

For the sake of simplification, a general assumption could be made and the heat conduction coefficient of the liquid phase alone was taken instead of the combination of the two phases.

This was right, because the effect of the vapor phase to the average heat conduction coefficient was very low compared to that of liquid. This assumption is not unique to this study [3].

Because the stuff was written in Turkish, all the sub- and superscripts were chosen among the letters from the Turkish alphabet, which denote the first letter of the word describing the object or situation. That is, the subscript *s* denotes the liquid phase, translated into Turkish "sıvı".

Just like this example, numerous other variables and parameters mentioned within this study were taken their names from the Turkish language.

The methods, which were utilized to solve the problem and obtain an empiric expression were stated in the appendix and gathered from mathematical books.

All the experimental data, done by Chawla, were given as tables in the appendix. Also, the non-dimensional terms were also stated within the section about application of the methods. Similarly, the results were given as tables too.

The comprehensive explanation of the methods were given as tables in the appendix. Of course, the selected method was considered much more extensively. The method which described the situation best was in form of a power law equation, which has the general expression of

$$y = ax^b \quad (5)$$

Note that *a* and *b* are denoting the coefficients, which are affected by the two parameters. *y* indicates the result, namely the heat convection coefficient and *x* is the independent variable. It is important to remind that this *x* here does *not* stand for the vapor quality.

Utilization of the selected method was separated into three parts.

In the first part, only the heat flux was considered to be the independent variable, where the mass-flow rate and vapor quality were fixed values or parameters.

In other words, the independent variable of the equation above was *q*, the result *h* and the two parameters *G* and *x* were enclosed within the coefficients *a* and *b*.

The second step was the calculation of the coefficients (*a* and *b*) which took place in the selected method.

Then, as soon as the general expression for certain values of *G* and *x* were obtained, the independent variable was changed.

Within the second evaluation, the independent variable was *x*, where the two parameters had to be *G* and *q*.

However, at this point another expression yielded a better result for many of the data. Unless the higher values of *x*, the data showed a tendency to be changing fairly linear. But after a certain value of *x* (that was 0.8), the general type changed and turned to the power law expression again.

Normally, a third evaluation, which should have implied the mass flow rate as the independent variable, was to be awaited, some problems occurred. The experimental data seemed to be extremely irregular for certain

values of vapor quality (ranging from 0.1 to 0.5) and therefore unsuitable for any curve fit.

The effect of mass flow rate change without the vapor quality being considered as a parameter yielded logical results and taken into consideration as well.

A comparison between the experimental data and calculated results were given both graphically and as tables in the appendix.

The step-by-step application of the selected method and other important statements were given in the relevant section of the study.

Other information, such as the physical properties of the refrigerant 11, the heat transfer concepts, the liquid-vapor phase change phenomena were stated as independent sections within this thesis. Also, a general consideration of parameters affecting the heat convection and a vast research of previous studies on similar cases were added.

Finally, the evaluation of the results and some suggestions for improvement took place. In that part, the future research probabilities and some other aspects (which were not considered here) were stated and argued.

One can say that the obtained result is fair and can be applied to problems with similar or same conditions.

$$Nu = 2303.626x^{0.287} \left(\frac{G}{G_0} \right)^{0.649} \left(\frac{qd}{k_s t_d} \right)^{0.212} \quad (6)$$

Here, x denotes the vapor quality, G the flow rate of the refrigerant, G_0 a certain value of the flow rate which is about 25.6 kg/h, q the heat flux, d the inner diameter of the tube, k_s the heat conduction coefficient of the liquid phase of the refrigerant and t_d the saturation temperature of the refrigerant.

The standard deviation of the obtained equation is about 17.82 percent, which is quite satisfactory.

The maximum deviation is approximately 131 percent. That seems to be a large value but this is only one value and can be observed as a mistake in experimental measurements.

Minimum deviation is only 0.1 percent which is a very good result and denotes a good accuracy.

In this final equation, all the terms are nondimensional and therefore the result Nusselt number. Also, the inner diameter of the tube should be given as the hydraulic diameter in case of non-circular cross sectional area of the tube.

The hydraulic diameter can be obtained via the equation:

$$d_{hyd} = \frac{4A}{P} \quad (7)$$

Here, A is the cross sectional area where the flow occurs through. P denotes the perimeter in contact with the refrigerant flowing through the tube.

The closed form of the final equation can be given as follows:

$$Nu = ax^b G^c q^d \quad (8)$$

It is important to remember that this expression is only valid for given conditions. These are, small diameter tube, refrigerant flow and applied heat flux of constant value.

Generally, the other studies following this one should contain the effect of other certain parameters such as roughness of the tube, effect of fins, movement, refrigerant mixtures etc.



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bu tez çalışmasında temel amaç olarak yatay boru içinde buharlaşarak akmakta olan bir soğutucu akışkanın söz konusu olduğu halde ısı taşınım katsayısının çeşitli fiziksel parametrelere göre değişiminin incelenmesi hedeflenmiştir.

Soğutucu akışkan olarak kullanılan Freon 11, çapları 6, 14 ve 25 mm olan borular içinde buharlaşarak akarken soğutucu akışkanın debisi ve kuruluk derecesi, uygulanan sabit ısı akısı ve buharlaşma sıcaklığı ölçülerek elde edilen değerler tablolar haline getirilmiştir [2].

Verilerin kapsamlı incelemesi sonucunda, düşük ısı akısının söz konusu olduğu hallerde ısı taşınım katsayısının ağırlıklı olarak soğutucu akışkan debisinin bir fonksiyonu olduğu, yüksek ısı akısının söz konusu olduğu hallerde ise ağırlıklı olarak uygulanan ısı akısının bağlı bir fonksiyon haline geldiği tespit edilmiştir.

Grafiksel olarak ifade edilen veriler, kuruluk derecesinin belirli bir değeri için ısı taşınım katsayısında bir tepe noktasının var olduğunu göstermiştir. Özellikle soğutucu akışkan debisinin yüksek olduğu hallerde bu durum daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır.

Genel yapıları itibarıyla kullanılan veriler uygun boyutsuz sayıların belirlenmesi halinde ısı taşınım katsayısını iyi bir yaklaşıklıkla ifade edebilecek bağıntıların bulunabileceğini göstermiştir ve bu çalışmayı mümkün kılmıştır.

Çalışmayı makul boyutlarda tutmak amacıyla değerlendirme dışında tutulan izafi basınç düşümü verilerinin de ayrı bir çalışmayla yüksek bir yaklaşıklık sağlayacak şekilde bağıntılar haline getirilmesi mümkün görünmektedir.

Bunun dışında, borunun iç yüzeyinin pürüzlü olması halinde ortaya çıkabilecek durumları içeren ayrı bir çalışma da yapılabilir [3,8,10].

Nikuradze'nin kum pürüzlülüğü probleminin bu duruma uygulanmasıyla bu mümkündür.

Bu tez için yapılan literatür araştırması sırasında dikkat çekici bir nokta da dar kanal ve borularda akışlar için bu problemin uygulanması olasılıklarıdır [2,3,5,7,8,10,12]. Kılcal borular ve benzeri hallerde de benzer hesaplar yapılması mümkün görünmektedir.

İleride benzer konu üzerinde yapılabilecek çalışmalar hakkında ayrıntılı bilgi ve değerlendirme tezin 14. bölümünden itibaren anlatılmaktadır.



BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

Isı, bir tür enerji olup dışarıdan herhangi bir zorlama olmadığı takdirde kendiliğinden yüksek sıcaklıktaki kaynaktan düşük sıcaklıktakine akma eğilimi gösterir [1]. Buna mühendislikte verilen isim olan “Isı Geçişi” yüzyıllardır derinlemesine incelenen ve kapsamı oldukça geniş olan bir konudur. Konunun bu derece geniş ve yerine göre karmaşık olması nedeniyle günümüzde artık ısı geçişi yerine problemin durumuna uygun olarak özel adlar kullanılmaktadır. Bu adlar, genel olarak ısı geçişinin meydana geldiği şartları temsil etmektedirler.

Isı geçişinde birden fazla yol olduğu ve bunların gerek tek tek ve gerekse de bir arada meydana gelebildiği hatırlandığında, konunun dışarıdan görüldüğü kadar basit olmadığı anlaşılmaktadır.

Isı geçişi, üç farklı yol olan iletim (kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışınım (radyasyon) ile olmaktadır. İletim, ağırlıklı olarak katı cisimlerde önemli iken taşınım sadece akışkanlara mahsus bir ısı geçişi türü olması nedeniyle iletimden ayrı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Işınım da iletim gibi hem katılarda ve hem de akışkanlarda geçerli olan bir ısı geçişi yolu olarak taşınımdan ayrılmaktadır.

Isı taşınımının söz konusu olduğu hallerde, akışkanın buharlaşma veya yoğuşmasının yanında hangi fiziksel şartlar altında bulunduğu, bir boru içinden akıyor ise debisinin ne olduğu, doğal taşınımın olup olmadığı gibi bir çok yan etkenler probleme dahil olmaktadır. Bunların da tek tek veya bir arada olabilmeleri ihtimali göz önüne alındığında, ısı taşınımı problemlerinin neden ayrı bir yere sahip olduğu ve daha dikkatlice incelenmesi gerektiği anlaşılabacaktır.

Genel olarak, ısı taşınımı ile ilgili olan problemlerin büyük çoğunluğunda ana amaç sistemin fiziksel özelliklerini boyutsuz sayılar

cinsinden ifade ederek mevcut durumu en iyi karakterize edecek bir ısı taşınım katsayısı bulmaktır. Sisteme ait verileri elde etmek için yapılan deneylerden bulunan sonuçlar da çoğu kez ampirik ifadeler yardımıyla bağıntılar halinde verilmektedir [2,3,4,5,6,10,11,12]. Bunun nedeni, ısı taşınımının karmaşık yapısı ve olaya etki eden parametrelerin her zaman tam olarak tespit edilmesinin mümkün olamaması yüzünden teorik ifadelere ulaşamamasıdır.

Isı geçişinin ağırlıklı olarak taşınımına bağlı kaldığı problemlerde bir akış veya buharlaşma (veya her ikisi birden) söz konusu ise ısı taşınım katsayısının değişiminin doğru olarak saptanması için de problemin fiziksel yapısının iyi anlaşılması büyük önem kazanmaktadır.

- Sözelimi, buharlaşma sırasında akışkan sıcaklığının sabit kalmasına rağmen gizli ısı nedeniyle sistemden sürekli olarak akışkana bir ısı geçişi cereyan etmesi, ısı taşınım katsayısının ani olarak artmasına yol açmaktadır [2].

Akışkanın durgun halde olmayıp aktığı halde ise, ısı taşınım katsayısına doğrudan doğruya ve artırıcı yönde etki eden türbülans durumu meydana gelmektedir. Hatta ısı taşınımının yapay yollardan artırılmasına çalışılan hallerde en çok başvurulan yol da türbülans yaratıcı yöntemlerin uygulanmasıdır.

Hem akışın ve hem de buharlaşmanın aynı anda gerçekleştiği hallerde ise ısı taşınımının büyük ölçüde arttığı bilinmektedir. Bu gerçeğe dayanarak, özellikle endüstri uygulamalarında rastlanılan ısı değiştiricilerinde, akışkan akımının yanı sıra buharlaşma da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tip ısı değiştiricilerinin dahil olduğu sistemin genel verimini kötü yönde etkilememesi için soğutucu akışkanın debisini artırıcı önlemler ancak bir yere kadar alınabilmektedir. Aşırıya gidilmesi halinde doğan basınç kayıplarının, elde edilen ısı taşınım katsayısındaki artışa bağlı kazançtan fazla olmaya başlamasına izin vermemek gerektiğinden, bu sistemlerde yer alan ısı değiştiricilerinin hepsinde buharlaşma işlemi kullanılmaktadır.

Bu tip cihazların söz konusu olduğu hallerde de ölçümlerin yapılabilmesi, boru içindeki ısı taşınım katsayısının bilinmesi yoluyla mümkün olabileceğinden elden geldiğince çok parametreyi göz önüne alan ve en güvenilir ifadelerin kullanılması kaçınılmaz olmaktadır. Çoğu kez mevcut duruma tam olarak karşılık gelen ifadeler olmadığından ya deney yapma yoluna gidilmekte ve sadece o hal için geçerli olacak bir değeri saptayabilmek için yüklü meblağlar ödenmekte ya da ihtiyaca cevap verebilecek yeni teoriler aranmaktadır.

Yeni teoriler aranırken karşılaşılan en büyük güçlüklerden birisi, boru içinden buharlaşarak akmakta olan akışkanın herhangi bir kesitinde hem sıvı ve hem de buhar fazlarının bir arada bulunması, yani iki fazlı bir akışın söz konusu olmasıdır.

Bu noktada, ısı geçişi kadar hidrodinamik konusu da önem kazanmaktadır. Çoğunlukla izlenen yol, akışa ait denklemin analoji yoluyla ısı geçişine uygulanmasıdır.

BÖLÜM 3

BUHARLAŞMA TEORİSİNE KISA BİR BAKIŞ

Termodinamikten bilindiği üzere sıvıların buharlaşma sıcaklığı basıncın fonksiyonu olarak değişmektedir. Şayet bir kapalı kap (kazan) içinde bulunan akışkanın temas ettiği ısıtma yüzeyinin sıcaklığı θ_y akışkan sıcaklığı θ_a ise ısıtma yüzeyinden geçen q ısı akısının büyüklüğüne göre $\theta_y - \theta_a$ sıcaklık farkı değişir ve farklı şekilde buharlaşma (taneli, çekirdekli, cep, film buharlaşma gibi) meydana gelir [1].

Aslında çalışmada adı geçen buharlaşma hali akış halindeki durumu gösteriyor olmasına rağmen prensipte aynı fiziksel olayların meydana geliyor olması ve temel kavramların tanıtılabilmesi nedeniyle bir yatay ısıtıcı yüzeyle temas halindeki durgun akışkanın buharlaşmasının anlatılması ve ardından da akış olması halinde nelerin değişeceğinin belirtilmesi daha uygun görülmüştür.

Buharlaşma ile ilgili hesaplarda kullanılan ifadeler de fazlaca değinilmemiştir. Zira bu teze konu olan problemde kullanılan ifade ve bağıntıların ayrıntılı olarak yazılması yaklaşık olarak ikinci bir tez hazırlanmasına yetecek ölçüde fazla yer işgal edecektir.

Buharlaşmanın fiziksel anlamı ve akışkan açısından durumun incelenmesi amacıyla genelde meydana gelen değişimler birer diyagram üzerinde gösterilir. Bu, hem deney sonuçlarında elde edilen verilerin teoriye aktarılmasında ve hem de olayın fiziksel parametrelere göre nasıl değiştiğinin tespit edilmesinde büyük ölçüde yarar sağlamaktadır.

Buharlaşma olayı bir diyagram haline getirildiğinde genel olarak dört adet farklı özellik gösteren bölgenin varlığı gözlenebilir [1]. Bu bölgelerin her birinde buharlaşmanın değişik aşamaları olmaktadır.

Birinci bölgede, ki burada faz değişimi olmamaktadır. Yatay olan ısıtma yüzeyinde sıvı fazdaki akışkandan $\Delta\theta = \theta_y - \theta_a$ sıcaklık artması q ısı akısı

ile birlikte olur. Bu bölgede ısıtma yüzeyinde buhar habbesi meydana gelmez, zira faz değişimi henüz söz konusu değildir.

Bununla beraber, ısıtma yüzeyinin sıcaklığının akışkanın sıcaklığından önemli ölçüde yüksek olması halinde “soğuk kaynama” adı verilen durum görülür. Çok az miktarda buhar çekirdekleri teşekkül eder. Bu bölgede akışkanın ortalama sıcaklığı, basınca karşılık gelen buharlaşma sıcaklığından daha düşüktür.

Buharlaşma sıcaklığı ile akışkanın ortalama sıcaklığı arasındaki fark, “soğuk kaynama sıcaklığı” olarak adlandırılır (ing. Subcooling). Bu bölgede doğal ısı taşınımı söz konusudur.

İkinci bölgede, ısı akısının arttırılmasına paralel olarak sıcaklık farkı da yükselir ve ısıtma yüzeyinde çekirdek buharlaşma meydana gelir. Taneli kaynama adını da alan bu halde ısı akısının değeri arttıkça sıcaklık farkı da artmayı sürdürür. Ancak bu artım azalan bir artımdır ve kritik bir ısı akısı değerine ulaşana kadar devam eder. Bu esnada buhar çekirdeklerinin sayısında bir artma gözlenir.

Isıtma yüzeyinde meydana gelen buhar çekirdeklerinin yüzeydeki şekilleri farklı olabilir. Buna neden olan, ısıtma yüzeyinin şekli ve pürüzlülüğüdür.

Diğer yandan, basınç arttıkça doğal olarak habbelerin çapları da küçülecektir.

Buhar habbeleri, hacimleri belirli bir değeri aştığında ısıtma yüzeyinden ayrılır. Geride kalan boşluğa hemen sıvı halde bulunan akışkan gelir. Bu şekilde de bir akış oluşur.

Yüzeyden ayrılan bir habbe, büyüklüğüne de bağlı olarak su yüzeyine doğru farklı şekillerde yükselir. Yükselme sırasında giderek açılan helisel bir yörünge izlerken aynı zamanda titreşim de yapabilir. Elbette ki sıvının yüzeyine yaklaşıldıkça azalan hidrostatik basınç nedeniyle habbe üzerindeki basınç değeri de düşer ve buna bağlı olarak habbenin çapı giderek büyür.

Hacim büyümesinin bunun yanı sıra ikinci bir nedeni daha vardır. Habbe yüzeye doğru ilerlerken ısı geçişi devam etmekte ve doğal olarak habbenin hacminde bir artma olmaktadır. Bu sırada akışkanın ortalama

sıcaklığı, o andaki basınca karşılık gelen buharlaşma sıcaklığı ile aynı değerdedir.

Üçüncü bölgeye geçiş anı olarak tanımlanabilecek olan noktaya yaklaşıldıkça buhar çekirdeklerinin sayısı fazlalaşır ve habbeler sıvı yüzeyine doğru bir zincir oluşturacak şekilde yükselmeye başlar. Bunun daha ileri aşamalarında ise buhar habbeleri bir tür hortum meydana getirirler.

Kritik noktaya gelindiği anda ısıtma yüzeyinin tamamı buhar habbeleri ile kaplanmış ve komşu buhar çekirdekleri birleşerek buhar yastıkları meydana getirirler.

Buharın ısı geçişine karşı direnci sıvıya oranla daha yüksek olduğundan gittikçe büyüyen buhar yastıkları ısı geçişini iyice güçleştirir. Bunun sonucunda ısıtma yüzeyinin sıcaklığında ani bir artma gözlenir. Hatta ısı akısının en büyük değere ulaştığı anda ısıtma yüzeyi tamamen buharla kaplanmış olduğu için sıcaklık bir anda malzemenin erime sıcaklığını dahi geçebilir. Bu anda ısıtma yüzeyinin mukavemeti azalır ve patlamalar meydana gelir. Kritik ısı akısına karşılık gelen bu noktaya “yanma noktası” denir. İngilizce’de burn-out denilmektedir.

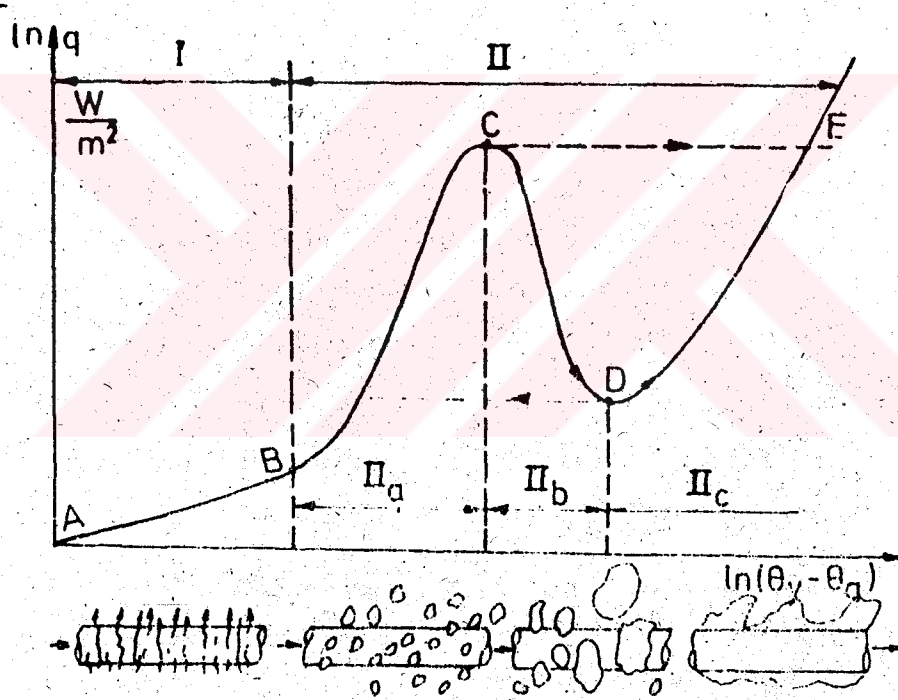
Yüksek sıcaklığa dayanıklı malzeme kullanılmış olan ısıtma yüzeylerinde ise belirgin bir yanma noktası söz konusu olmaz ve buharlaşma olayının devamında ısıtma yüzeyinden akışkana ısı geçişi buhar filminde ısı iletimi ve ısı ışınımı yoluyla olur. Isı taşınımı olmaz ve bu esnada ısı akısı da sabit değerde kalır. Bu hal, daha çok Wolfram ve Molibden gibi erime sıcaklığı diğer malzemelere oranla yüksek olan bileşenler içeren ısıtma yüzeylerinin söz konusu olur. Normal malzemelerde ise belirgin bir yanma noktası gözlenir.

Normal malzemelerin kullanıldığı hallerde kritik ısı akısı değerinden başlayarak ısıtma yüzeyinin sıcaklığının değişmediği düşünülürse stabil olmayan bir film buharlaşması meydana gelir. Stabil olmayan film buharlaşmasından kasıt, film buharlaşması ile çekirdek buharlaşma arasında gidiş gelişler olmasıdır. Kararsız bir buharlaşma da denilebilir.

Isı akısının belirli bir değerine dek durum böyle devam ettikten sonra stabil olmayan buharlaşma yerini stabil buharlaşmaya bırakır ve gerek yanma noktası belirgin olan normal malzemelerde ve gerekse de yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerde bu andan itibaren kararlı film buharlaşması başlar ve devam eder. Artık ısı akısına bağlı olarak sıcaklık farkı orantılı olarak yükselmeyi sürdürür.

Film buharlaşması sırasında ısı taşınım katsayısı çok büyük düşüş göstermektedir.

Normal şartlar altında, yukarıda anlatılan hususlar ışığında kuruluk derecesi ile ısı taşınım katsayısının değişimi bir grafik yardımıyla gösterilecek olursa aşağıdaki durumlar meydana gelir [1].



Şekil 3.1 Buharlaşma olayında $h-(\theta_y - \theta_a)$ değişimi [1]

İnceleme yapılırsa, çekirdek buharlaşma halinden film buharlaşma haline geçiş sırasında bir kritik x değeri olduğu görülmektedir. Bu noktada akışkan sıcaklığı, buharlaşma sıcaklığı ile aynı değerde kaldığı halde ısıtma yüzeyi sıcaklığı artmaya devam etmektedir. Bu haldeki ısı akısına da çekirdek buharlaşma halinden ayrılma ısı akısı denilebilir.

Çekirdek buharlaşmadan ayrılma halindeki ısı akısı değeri buhar kazanları gibi uygulamalarda önemlidir ve bu nedenle de konu üzerinde çok sayıda araştırma yapılmıştır.

Bu çalışmalarda elde edilenn sonuçların tamamı sadece belirli hallerde geçerliliğini koruyan ampirik ifadelerdir ve henüz kabul görmüş tek bir bağıntı bulunmamaktadır. Burada da ampirik ifadeleri tek tek vererek gereksiz yer işgal etmemek için ilgili bağıntı ve ifadelerin çeşitli kaynaklarda geniş olarak yer aldığını belirtmek yeterlidir.

Buharlaşma sırasında meydana gelen ve adından sıkça söz edilen bir diğer kavram da "suyun sürüklenmesi" dir. Suyun sürüklenmesi kavramı aslında habbe deformasyonu ve su yüzeyinde habbe patlaması konularıyla içiçe geçmektedir.

Habbelerin şeklinin ve boyutlarının ısıtma yüzeyinin pürüzlülüğüne ve basınca bağlı olarak değiştiği önceden anlatılmıştı. Isıtıcı yüzeyden ayrılarak sıvı yüzeyine doğru hareket eden habbeler yüzeye ulaştıklarında belirli bir modele göre patlarlar. İşte bu patlama sonucunda sıvı fazdan ayrılarak buhara karışan minik sıvı zerrecikleri buharın yükselme hızı büyük, buhar bölgesinin yüksekliği küçük ve buhar bölgesinin çıkışında bir separatör (ayırıcı) yok ise buhar ile beraber sürüklenmeye başlarlar. Buna "suyun sürüklenmesi" denir ve genel olarak akışın x kuruluk derecesi değerini önemli ölçüde düşürücü etki yapar.

Sürüklenen sıvı zerrelerinin izledikleri yolların tespit edilmesi için de çok sayıda çalışma yapılmış ve elde edilen sonuçlar deneyler ile büyük ölçüde uyum sağladığından genel bir ifade olarak kabul edilmiştir.

Soğutma devrelerinde buharlaşma halindeyse, buharlaştırıcıda sıvı fazda bulunan soğutucu akışkan ile buhar fazında bulunan aynı soğutucu akışkanın bir arada akımları söz konusu olduğundan bir iki fazlı akım hali ortaya çıkmaktadır.

Buharlaştırıcı içerisindeki akım esnasında giriş kısmında kuruluk derecesi 0.1-0.15 arasında olan soğutucu akışkan belirli miktarda ısıyı çekerek buharlaşmaya devam eder ve buharlaştırıcı çıkışında da kuruluk

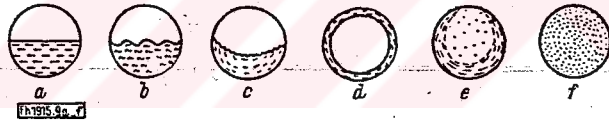
derecesi 1 değerine ulaşmış olur. Çalışma şartlarına göre bu değerler ortalama olarak alınır.

Buharlaştırıcılar da genellikle borulardan meydana geldiğinden, bu teze konu olan problem, yani borular içerisinde iki fazlı akım sırasında ısı geçişi ve ısı taşınım katsayısının hesaplanması ortaya çıkar.

Boru içerisinde kuruluk derecesi değeri sürekli olarak değiştiğinden iki fazlı akışın karakteri de buna bağlı olarak değişmektedir. Hesabı güçleştiren önemli etkenlerden biri olan bu duruma çeşitli çözümler üretilmeye çalışılmaktadır. Bu tezde de nümerik metodlar aracılığı ile bu sorunun önüne geçilmeye çalışılmıştır.

Burada önemi olmamakla beraber genel hali ilgilendirdiği için belirtmesinde fayda olan bir nokta da, soğutucu akışkanın içinden akmakta olduğu borunun yatay veya düşey olmasının da sonuç üzerinde azımsanamayacak oranda etkili olduğudur.

Yatay borular içerisindeki iki fazlı akışlar söz konusu olduğunda ortaya çıkan çeşitli durumlar aşağıda ayrıntılı olarak gösterilmektedir [1,2].



Şekil 3.2 Buharlaştırma olayında akış şekilleri [2]

Birinci şekilde, sıvı ve buhar fazları birbirinden tamamıyla ayrılmıştır ve sıvının yüzeyi düzdür. Bu durum çok düşük debideki akışlar halinde sıkça rastlanan haldir.

Sıvı yüzeyinin nispeten dalgalı olduğu hale karşılık gelen ikinci şekilde, sıvı ve buhar fazları halen kesin bir şekilde ayrılmıştır.

Üçüncü halde, sıvı kısım boru cidarlarında yükselme eğilimi göstermektedir. Sıvı yüzeyinde kısa dalgalar oluşmuştur ve borunun ekseninde buhar tarafından sürüklenen sıvı zerrecikleri bulunmaktadır.

Halka akış olarak tanımlanabilecek olan dördüncü halde ise sıvı faz bütün boru çevresini yalamaktadır. Ortada kalan boşlukta ise buhar

fazındaki akışkan akmaktadır. Ancak hala sıvı ile buhar fazları arasında belirgin bir ara yüzey mevcuttur.

Bu durumun biraz daha ilerlemiş hali olan beşinci halde ise sıvı ile buhar fazları arasındaki ara yüzey çözülmüştür. Bunun doğal sonucu olarak borunun cidarlarına yakın ve yerçekimi nedeniyle de alt kesimlerinde net olarak buhardan ayrılmamış olmakla beraber bir sıvı fazı akmaktayken, borunun eksenine yakın kısımlarda sis halinde buhar ve buhar tarafından sürüklenen sıvı zerreciklerinin oluşturduğu çekirdek akmaktadır. Bu hale çözülmüş halka akış adı da verilebilir.

Altıncı halde ise artık ayrı bir sıvı fazı gözlenmemektedir. Burada tüm boru kesitinde homojen ve karışık (buhar ve buhar tarafından sürüklenen sıvı zerrecikleri) bir akış söz konusudur.

Bu tanımlamalar tam olarak birbirinden ayrılmamakla beraber, teze temel olan çalışmada verilen tarifler olduklarından bu şekilde kullanılmışlardır. Farklı kaynaklarda daha ayrıntılı tanımlamalar da (cepler halinde akış, darbeli akış vs.) mevcuttur [1].

Düşey halde de buna benzer tanımlamalar yapılabilmektedir ama bu çalışma ile doğrudan ilgili olmadığından ayrıca değinilmeyecektir.

Aslında buharlaşma olayı konstrüksiyon, akışkan cinsi, sistemin çalışma koşulları gibi çok sayıda parametreye bağlı olduğundan tek bir ifade vermek imkansızdır. Bu hallerde ya mevcut problemi yansıtan deneyler yapılarak sonuçlar elde edilmelidir ya da daha önceden yapılmış olan deneylerden yararlanılarak ampirik, mümkünse de bir teori meydana getirecek ifadeler bulunması yoluna gidilmelidir.

Literatürde bu konuda sayıca çok çalışma olmasına rağmen bunların hemen hemen tamamı evvelce bahsedilen nedenlerden ötürü sadece sınırlı hallerde geçerliliğini koruyabilen ifadelerdir.

Bir teori elde etmek çoğu kez mümkün olmasa da ampirik ifadelerin hiç değilse olabildiğince fazla parametrenin değişimini en iyi yaklaşıklıkla yansıtması amacına yönelik olarak nümerik çalışmalar, özellikle son yıllarda bilgisayar teknolojisinin de hızlı gelişimi ile daha kolaylaşmıştır.

Yukarıdaki kabuller ışığında bu çalışmada da önceden yapılmış deneyler (daha önceden belirtildiği üzere 1967 yılında Chawla tarafından Freon 11 kullanılarak yapılmıştı) sonucunda elde edilen veriler kullanılarak bir genel ifade bulunması denenmiştir [2]. Bilgisayardan hesap alanında yoğun olarak faydalanılmıştır.

Her ne kadar bilgisayar hesapları oldukça kolaylaştırırsa da sadece kendisine doğru veriler girildiği takdirde doğru sonuç verdiğiinden çalışmanın en önemli kısmı yine de işin temelini oluşturan ısı geçişine hangi parametrenin nasıl ve ne ölçüde etki edeceğinin yeterli yaklaşımla tespit edilmesidir. Aksi halde elde edilecek sonuçlar matematiksel yönden ne kadar iyi olursa olsun, buharlaşmanın fiziksel yapısına aykırı olabilir ve bu da bütün çalışmanın boşa gitmesine sebep olur.



BÖLÜM 4

İKİ FAZLI AKIŞLAR

İki fazlı akış terimi, özellikle teknolojinin gelişmesiyle beraber bilim dünyasında sıkça anılmaya başlanmıştır. Önceki bölümlerde verilen bilgiler ışığında bu terimden ne anlaşılması gerektiği tahmin edilebilir. Maddenin bulunabileceği dört temel halden (katı, sıvı, buhar ve plazma hali) ikisinin bir arada olduğu durumlar iki fazlı olarak adlandırılır. Örnek olarak, akış olsun olmasın buharlaşmanın devam etmekte olduğu sistemlerde iki fazlı hal söz konusudur. Benzer durum erimekte olan bir katı için de söylenebilir. Elbette ki yoğunlaşma veya katılaşma gibi hallerde de aynı durum geçerlidir.

Özellikle malzeme biliminde sıkça rastlanılan bir durum da “üçlü nokta” adı verilen durumda bulunan maddenin halidir. İkidenden fazla, ki bu halde bu sayı üç olmaktadır, fazın bir arada bulunduğu bir özel haldir.

Konumuz gereği burada sadece buharlaşmaya bağlı olarak gerçekleşen iki fazlı hallere değinilecek olduğundan diğer durumlardan bahsedilmeyecektir. Bu bağlamda, ilerleyen bölümlerde geçen bütün iki fazlı akış terimleri de buharlaşmakta olan bir sıvının söz konusu olduğu duruma işaret edecektir.

Buharlaşma konusunda da anlatıldığı üzere, iki fazlı bir akış söz konusu olduğunda problem karmaşık bir hal almaktadır. Bunun nedeni, sadece iki farklı akışkan türünün aynı kesit içerisinde bir arada yer alması değil, her iki tabakanın da birbirini doğrudan doğruya etkilemesidir.

Doğrudan doğruya etkileme terimini açıklamak için kullanılabilecek en iyi örnek buhar içerisinde sıvı taneciklerinin sürüklenmesidir. Daha önceki konuda ayrıntılı olarak incelenen bu hal, ısı taşınımı veya daha genel olarak söylenecek olursa ısı geçişi problemlerini büyük ölçüde güçleştirici etki yapan bir sonuç doğurur.

İki fazlı akışları daha kolay hesaplayabilmek için ortaya atılan teorilerin tamamına yakını deneyleri temel alarak yola çıkıldıktan sonra elde edilmiştir. Bunlar için belirli gruplamalar yapmak doğru olmayacaktır, zira faz değişimi ve iki fazlı akış sırasında olaya etki eden parametreler arasında akışkan cinsi, boru veya kanalın konstrüksiyonu ve akışın gerçekleştiği şartlar vardır.

Oldukça basit gibi görünen problemlerde bile bu değişkenlerin teoriye uygulanması kolay olmamaktadır. Özellikle bazı özel konstrüksiyonların söz konusu olduğu hallerde geometriyi temsil eden parametrelerin sisteme nasıl etki edeceğinin hesaplanması zordur.

Buharlaşma olayı da iki fazlı akışın bir çeşidi olduğundan, devam etmekte olan buharlaşma sırasında olaya etki eden temel üç parametrenin varlığından bahsetmek yanlış olmaz. Aslında genel olarak her türlü iki fazlı akış probleminde şu veya bu şekilde bu parametreler işin içine girmektedir.

Bu parametreler borunun geometrisi, ki bu tez için ve benzeri pek çok çalışma için borunun çapı ve/veya uzunluğu, şekli, durumu gibi alt değişkenler içeren “konstrüksiyon”; akışın cinsi, ki bu da kendi içinde çeşitli akış şekilleri olarak gruplara ayrılmaktadır ve bu konu buharlaşma başlığı altında ayrıntılı olarak incelenmiştir, akışın fiziksel parametrelerinden (hız, düşey veya yatay olma hali gibi) meydana gelen “akışın şartları”; akışkanın temel termodinamik ve fiziksel özellikleri, ki buna örnek olarak Chawla tarafından Freon 11 kullanılması verilebilir, alt gruplarından oluşan “akışkan cinsi” olmak üzere gruplanabilir [2].

Sıvı halden buhar haline geçiş esnasındaki karmaşık oluşumlar ve olaylar daha kolay hesaplanabilen ve önceden incelenmiş olan daha basit hallere indirgenmeye çalışılır. Bunun mümkün olabildiği durumlarda çözüm için mevcut bazı teoriler yeterli olmaktadır.

BÖLÜM 5

SOĞUTUCU AKIŞKANLAR

Soğutucu akışkan (İng. refrigerant), fiziksel ve termodinamik özellikleri dolayısıyla soğutma amaçlı sistemlerde buharlaşma yoluyla ısıyı çeken akışkanlara verilen genel addır.

Bu akışkanların bulunduğu sistemler pek çok kez basınç altında çalışır. Zira, gerek doğal ve gerekse de suni yoldan elde edilen soğutucu akışkanlar oda şartlarında buhar halinde bulunurlar. Başka bir deyişle, buharlaşma sıcaklıkları oldukça düşüktür. Buna bağlı olarak, erime sıcaklıkları da alışlagelmiş soğutuculara oranla (ilk akla gelen buz olacaktır) çok daha düşüktür.

Normal olarak bir buz kalıbı ile yapılabilecek soğutma işleminin alt sınırı ancak 273 K mertebesinde olacaktır. Söz konusu olan bir su şişesinin soğutulması olduğunda bu miktar yeterli olmakla birlikte, teknikte ihtiyaç duyulan değerler bunun çok altında yer almaktadır. Pastörizasyon gibi ısı tekniği ile ilgisi olmayan kişilerin bile biraz olsun bildiği işlemlerde 255 K civarındaki değerlerin kullanılmakta olduğu düşünülürse bunun önemi daha iyi anlaşılır.

Yüksek teknoloji gerektiren uygulamalarda (uzay çalışmaları, yarı-iletkenler, genetik) neredeyse mutlak sifıra yaklaşan değerler ile çalışılmaktadır. Küçük çaplı uygulamaları düşünürsek akla ilk gelen “kuru buz”, karbondioksit buharının basınç altında katılaştırılması ile elde edilen ve oda şartlarında süblimasyon ile havaya karışan 195 K sıcaklığa sahip bir soğutucu maddedir.

Sıvılaştırılmış azot (nitrojen), oksijen ve helyum gibi gazlar daha da düşük buharlaşma sıcaklığına sahiptir. Hatta helyumda bu değer 4 K mertebesine kadar inmektedir.

Elbette ki bu uygulamalarda ihtiyaçların yanı sıra ekonomiklik te önemli bir parametre durumundadır. Marjinal haller dışında kolay elde

edilebilen ve ihtiyaçlara yeterince cevap verebilen akışkanlar tercih edilmektedir.

Son yirmi yıllık dönemde kullanımı, içerdiği kloro-floro-karbon bileşiklerinin ozon tabakasına ve dolayısıyla dünya ekolojisine zarar verdiği anlaşıldığı için kısıtlanan Freon 11, Freon 12, Freon 22 gibi klasik sayılabilecek soğutucu akışkanlar göreceli olarak, gerek ucuzluk, gerek elde edilebilirlik açısından tercih edilmekteydi.

Freon 134a gibi daha yeni ve ozon tabakasına zararı olmayan soğutucu akışkanlar da yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Amonyak kullanan absorpsiyonlu sistemler dışındaki hemen tüm normal soğutma uygulamalarında bu ve benzeri soğutucu akışkanlar tercih edilmektedir.

Bu teze kaynak teşkil eden çalışmada deneylerde kullanılan soğutucu akışkan Freon 11 olduğundan ona ait fiziksel ve termodinamik özellikler aşığıdaki tabloda verilmektedir [2].

Freon 11 haricinde akışkanların kullanıldığı soğutma devreleriyle ilgili çalışmalarda da benzer tablolar verilmektedir [3,7,8,10,12].

Tablo 5.1 Freon 11'in fiziksel özellikleri [2]

Sıvı					
Sıcaklık	Yoğunluk	Dinamik viskozite	Gizli ısı	Isı iletim katsayısı	Özgöl ısı
t °C	ρ kg/m ³	η 10 ⁶ kps/m ²	r kcal/kg	k kcal/mh°C	c_p kcal/kg°C
0	1533,97	55,47	45,48	0,087	0,2100
10	1510,80	49,90	44,67	0,084	0,2115
16	1497,00	47,13	44,17	0,083	0,2123
20	1487,65	45,28	43,83	0,082	0,2130
Gaz					
Sıcaklık	Yoğunluk	Dinamik viskozite	Doyma özgöl hacmi	Isı iletim katsayısı	Özgöl ısı
t °C	ρ kg/m ³	η 10 ⁶ kps/m ²	v m ³ /kg	k kcal/mh°C	c_p kcal/kg°C
0	2,4691	1,041	0,405	0,0067	0,1310
10	3,6101	1,073	0,277	0,0070	0,1330
16	4,4900	1,090	0,222	0,0070	0,1345
20	5,1546	1,101	0,194	0,0071	0,1354

BÖLÜM 6

ISI GEÇİŞİNDE TEMEL KAVRAMLAR

Isı, bir enerji çeşidi olup dışarıdan sisteme bir etki yapılmadığı takdirde kendiliğinden sıcaklığı yüksek olan kaynaktan düşük olana akma eğilimi gösterir. Bu olaya mühendislikte ısı geçişi adı verilir. Olayın gerçekleşme şekline göre çeşitli alt gruplara ayrılır ve her biri de karakteristik isimlerle anılır [1].

Isı iletimi, özellikle katı cisimlerde önemli olup, maddeyi meydana getiren moleküllerin enerjiyi birbirlerine aktarmaları yoluyla gerçekleşir. Isı iletimi söz konusu olduğunda sıkça duyulan terimlerden birisi olan “ısı iletim katsayısı”, maddenin ısıyı iletim yoluyla ne oranda geçirdiğinin bir göstergesidir. Mevcut en yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemeler saf bakır ve gümüşür.

Isı taşınımında ise maddeyi meydana getiren moleküllerin makroskopik hareketleri söz konusudur. Katı maddeler için bir “ısı taşınım katsayısı”ndan bahsedilemez, zira molekül hareketleri makroskopik düzeyde olamamakta, ancak titreşim mertebesinde gerçekleşebilmektedir. Buna karşın, sıvı veya buhar halinde bulunan maddeler için ısı iletim katsayısı mevcuttur.

Genel olarak ısı taşınım katsayısı akışkanın fiziksel özelliklerine bağlıdır. Bu özelliklerin sıcaklık, basınç gibi sistem parametreleri tarafından kolayca etkilenmesi nedeniyle ısı taşınımı, ısı iletimi veya ısı ışıınımına oranla daha karmaşık bir yapı sergiler ve ısı geçişinin en geniş konusunu teşkil eder. Teze konu olan problem de ısı taşınımı ile ilgilidir.

Isı ışıınımında söz konusu olan durum, farklı sıcaklıktaki herhangi iki kaynak arasında sıcaklık nedeniyle oluşan ısı dalgalarıdır. Isı ışıınımı, iki katı yüzey arasında olabileceği gibi, bir katı ve bir gaz vb. arasında da olabilir. İki katı yüzey arasında ışıınım ile ısı geçişi olması için arada herhangi bir

ortam bulunmasına gerek olmaması, bu ısı geçiş türünün özellikle uzay uygulamalarında önemini arttırmaktadır.

Diğer iki türden farklı olarak, ısı ışıınımı için bir "ısı ışıınım katsayısı"nın varlığından bahsedilemez. Bunun yerine sisteme ait bir eşdeğer ısı ışıınım katsayısı hesaplanır ve problem bir nevi taşınım haline dönüştürüldükten sonra üzülür. Teori açısından en yeni olan ısı geçiş türü, ısı ışıınımıdır.

Aslında ısı geçişinin tanımına bakıldığında tam olarak bir ısı geçiş türü olarak değerlendirilemeyen, ancak meydana gelen olayın doğası araştırıldığında gerçekten de bir ısı geçişinin söz konusu olduğu bir durum da buharlaşmadır. Her iki kaynağın da sıcaklığının sabit kaldığı halde buharlaşma sırasında buharlaşan maddenin "gizli ısı" diye adlandırılan kadar enerjiyi sistemden çektiği görülür. Bu da bir ısı geçiş olduğundan diğer  türle birlikte, fakat ayrı bir başlık altında anılır.

Bu teze konu olan problemde, bir buharlaşma söz konusu olup, bu esnada ısı taşınım katsayısının değişimi gözlendiğinden, hem bir ısı taşınımı ve hem de bir buharlaşma problemi olduğu söylenebilir.

Elbette ki aslında bu tanım yeterince doğru değildir. Zira, akışkan tarafında sadece ısı taşınımı olduğu söylenemez. Aynı anda birden fazla ısı geçiş olayı meydana gelmektedir. Ancak problemi basitleştirmek ve hesaplarda bir ölçüde kolaylık sağlamak için etkisi nispeten az olan diğer ısı geçiş türleri taşınım ve buharlaşma ile ısı geçişinin yanında ihmal edilmiştir.

BÖLÜM 7

ISI TAŞINIMINA ETKİ EDEN PARAMETRELER

Isı taşınımı ile ilgili haller incelenirken probleme etki eden parametrelerin sayısının fazla olması, özellikle ilk hesaplamalar sırasında kullanılacak değişkenlerin dikkatlice seçilmesini gerektirmektedir. Gereğinden fazla veya az sayıda parametrenin işin içine sokulması ya problemi çözümü mümkün olmayan hale getirecek, ya da yanlış sonuç alınmasına neden olacaktır. Bu yüzden, hesaplamaya başlamadan önce sistemin iyi etüd edilerek ısı taşınımına etki edebilecek durumlar tespit edilmelidir.

Isı taşınımının hem durgun ve hem de hareket halindeki bir akışkan için söz konusu olabilmektedir. Akış, gerek bir boru veya kanal içinde ve gerekse de boru veya kanal dışında cereyan edebileceği için bütün olasılıkları bir arada düşünmek şarttır. Boru içindeki akışta önemli olan bir parametre, dıştaki akış için daha az önemli olabilir. Akışın söz konusu olduğu hal genel olarak durgun akışkan halini de kapsadığından daha geniş ele alınması normaldir.

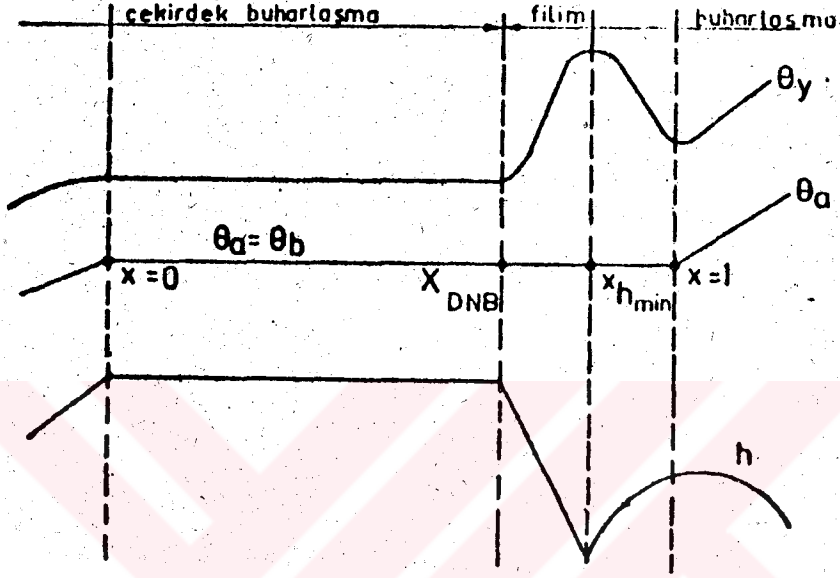
Boru dışındaki akışlarda, akışkanın yaladığı yüzeyin geometrisi, boruya hangi açı ile geldiği, bir boru demetinin arasından akıp akmadığı, borunun etrafında kanat vs. olup olmadığı gibi parametreler ısı taşınım katsayısına direkt olarak etki eder.

Boru içindeki akışta ise yine borunun geometrisi, yüzey pürüzlülüğü, borunun hareketli olup olmadığı, titreşim ve rezonansın varlığı, borunun dönme hareketi yapması vb. çok sayıda parametrenin ısı taşınım katsayısını hesaplarken göz önüne alınması gerekir [1,2,3,7,8].

Özellikle bu teze konu olan problem göz önüne alındığında, sözü geçen durumların bir kısmı kendiliğinden elenmekte ve nispeten daha basitleşmektedir. Buna karşın, akmakta olan akışkanın bir yandan

buharlaşıyor olması yeni bazı parametrelerin eklenmesine yol açarak çözümü biraz güçleştirmektedir.

Buharlaşıma esnasında ısı taşınım katsayısının fazların durumuna göre değişimi aşağıdaki gibi bir grafikte ifade edilebilir.



Şekil 7.1 Buharlaşıma esnasında h - x ve h - θ değişimleri [1]

Temel bazı kabuller yapıldığında, tez konusu problemin çözümünü kolaylaştırmak amacıyla bazı parametreler birinci derecede etkili sayılmayarak ihmal edilebilmektedir. Bu sayede de nispeten daha çabuk ve kolay bir çözüme ulaşılmaktadır. Ancak yapılan her ihmalin ve yuvarlatmanın olayın doğasından giderek daha fazla uzaklaşan sonuçlar doğuracağı unutulmamalıdır.

Isı taşınımına etki eden parametreler genel olarak göz önüne alındığında bu hal için en önemli olanlarının boru geometrisi, akışkan debisi, uygulanan ısı akısı, kuruluk derecesi ve borunun cidar sıcaklığı olduğu söylenebilir. Bu sayılanlardan boru geometrisi dışında hiç biri doğrudan doğruya ısı taşınımına etki eden parametreler olarak sayılamazsa da sonucu değiştiren parametrelerdir.

BÖLÜM 8

TEZE KONU OLAN PROBLEM

Bu teze konu teşkil eden problem, yatay bir boru içinde buharlaşarak akmakta olan bir soğutucu akışkanın söz konusu olduğu halde ısı taşınım katsayısının çeşitli parametrelere göre değişiminin ne yönde gerçekleştiğinin tespiti ve irdelemesidir.

Buharlaşma ve akış aynı anda gerçekleştiğinden söz konusu problem iki fazlı akış halinde ısı taşınım katsayısının belirlenmesi şekline dönüşmektedir. İki fazlı akışlar ve buharlaşma için ayrı ayrı teoriler olmasına rağmen iki halin bir arada bulunduğu durumlarda komple bir teorinin bulunmaması nedeniyle bu konu seçilmiştir.

Konunun işlenmesinde de ısı geçişinin temel kalıpları dahilinde ilerleyen bir konu akışı takip edilmiştir. Bu, hem konunun daha iyi anlaşılmasını ve hem de çözüme giden yolun daha kolay tespit edilmesini sağlamaktadır [2].

Bu amaçla yatay borular içinde akan bir soğutucu akışkanın buharlaşması incelenmeden önce, herhangi bir kapalı hacimde durgun halde bulunan bir akışkanın buharlaşması konusu araştırılmış, daha sonra da akış olması hali eklenmiştir. Fazla yer alacağı ve enerjinin fazlasıyla temel konularını tekrarlamaktan öteye geçmeyeceği için bu işlem burada yeniden yapılmamış, sadece süperpozisyon ilkesine göre yapılması gereken kabuller verilmiştir. Ancak izlenen temel yolun ne olduğunu açıklamak gereğinden yola çıkılarak kısaca da olsa bu noktaları hatırlatmanın faydalı olacağı şüphesizdir.

Kaynaklar kısmı incelenirse görüleceği gibi, tam olarak bu konuyu içermeyen, ancak mutlaka bir şekilde ortak yönleri olan çalışmalar seçilmiştir.

BÖLÜM 9

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Tezin kaynaklar kısmından da görülebileceği üzere geçmiş yıllar içinde konu üzerine bir takım çalışmalar yapılmıştır. Özellikle Chawla'nın temel alınması ile gerek yeni deneyler yapılarak ve gerekse de mevcut deney sonuçları kullanılarak teoriyi oluşturacak makaleler yayınlanmıştır. Ancak bütün bunlar bir teorinin bulunmasını mümkün kılamamıştır [2,4,5,12].

Kaynaklar kısmında görülen makaleler incelenirse Chawla'nın 1967 yılında konu ile ilgili çalışmasını takip eden süre içerisinde küçük farklarla da olsa benzer konuda yürütülen çalışmalarda hep aynı yöntemlerin izlendiği ve çoğu kez aynı temele dayanan metodların uygulandığı görülebilir. Açıklamak gerekirse, bu çalışmaların deneysel olanlarında genellikle Freon tipi soğutucu akışkanlar tercih edilmiş ve deneyler çoğu kez 6, 14 ve 25 mm çaplı borular kullanılarak yapılmıştır [2,10].

Teorik çalışmalarda ise mevcut deney sonuçlarının debi, uygulanan ısı akısı ve boru çapına göre (hatta son çalışmalarda kuruluk derecesi de bunlara ilave edilmiştir) gruplanan veriler haline getirilmesinden sonra bir nevi kuvvet fonksiyonuna uydurulmaya çalışıldığı kolayca tespit edilebilmektedir [4,5,9,12].

Bir kısım çalışmalarda ise tek bir bağıntı elde etmek yerine, verilere daha iyi uyum sağlayan iki farklı tipte fonksiyonun bulunarak toplanması yoluyla sonuca gidildiği görülmektedir [2].

Son yıllarda özellikle üzerinde durulmaya başlanan pürüzlülük ve ısı taşınımına olan etkisinin de işin içine girdiği bir kısım makale ve çalışmalar da dikkat çekmektedir. Dar kesit alanına sahip borularda daha da önemli görülerek derinlemesine incelenen pürüzlülük etkisinin doğal sonucu olarak aynı boru içindeki basınç düşmesi buna paralel şekilde incelenmeye başlanmıştır.

Pürüzlülüğün yanı sıra kanatçıkların veya pimlerin söz konusu olduğu haller de unutulmamalıdır [3,8,10].

1996 yılında beraber çalışan iki bilim adamı tarafından birbirinin peşi sıra yayınlanan iki makalede “küçük hidrolik çapa sahip mikro-kanatçıklı ve kanatçıksız alüminyum tüplerde Freon’12 nin yoğuşması” ve yine aynı durumda meydana gelen basınç kaybı ayrı ayrı incelenmiştir [3]. Bu da konunun önemini daha iyi göstermektedir. Her iki çalışma da International Journal of Heat and Mass Transfer adlı uluslararası bilimsel dergide yayınlanmıştır. Yang ve Webb tarafından yapılan çalışma daha çok deneysel ağırlıklı olmakla beraber, bazı korelasyon ve kabulleri içeren ekler bölümündeki bilgilerden oldukça faydalanılmıştır.

1979 yılında yayınlanan bir makalede ise “boruların içinde film yoğuşma esnasında ısı geçişi” incelenmiştir [5]. Film halinde yoğuşma temel olarak bu tezin konusuna tam olarak uymamakla beraber, boru içindeki akışkanın faz değiştirmesi durumunda yapılabilecek kabulleri içerdiği için ayrıca önemlidir. Yukarıda adı geçen dergide yayınlanan bu makalenin yazarı da Shah’tır. Chawla’nın deneylerinden bahsetmemesine ve buharlaşma yerine film yoğuşması söz konusu olmasına rağmen korelasyonların çıkarılmasında izlenen matematiksel metodun incelenmesi ve bu teze konu olan probleme uyarlanması amacıyla bu makale de kaynaklar arasına alınmıştır.

Bu tezin konusuna daha yakın olan ve çekirdekli buharlaşma konusuna değinen 1981 tarihli başka bir makalede ise zorlanmış taşınım da işin içine dahil edilerek korelasyonlar bu doğrultuda tespit edilmiştir [4]. Bu makalede Chawla’nın çalışmalarının dikkate alınmış olduğunu da özellikle belirtmekte fayda vardır. Çalışma, International Journal of Heat and Mass Transfer dergisinde yayınlanmış ve Karl Stephan ve Hein Auracher tarafından hazırlanmıştır. Zorlanmış taşınım ve buharlaşma konularını içermekle beraber, tek bir akışkan üzerinde yoğunlaşmamış, bunun yerine çok sayıda farklı akışkan için geçerli olacak daha genel çok sayıda korelasyonlar elde edilmiştir.

Yine 1981 tarihini taşıyan bir diğer makalede ise “gelişmiş akımda kaynama halinde ısı geçişi” konusu irdelenmiştir [6]. Burada incelenen akışkanlar Freon olmamakla beraber endüstride sık kullanılan diğer akışkanlar olan amonyak, su gibi maddeleri içermektedir. Birbirinden farklı çeşitli maddeler için ortak ve tek bir bağıntı elde edilmeye çalışılan bu makale, bu yönüyle diğerlerinden ayrılmaktadır. Makale, Shekrladze tarafından yazılmış ve yine yukarıda adı geçen uluslararası bilim dergisinde yayınlanmıştır.

Non-azeotropik Freon 22 ve 114 karışımının yatay boruda buharlaşmasında zorlanmış ısı taşınımına ilişkin bir korelasyonun söz konusu olduğu 1993 tarihini taşıyan ve International Journal of Heat and Mass Transfer adlı dergide yayınlanmış olan bir başka makale de, yatay borularda buharlaşarak akan bir akışkan bahis konusu edildiğinden kaynak olarak alınmıştır [12]. Takamatsu, Momoki ve Fujii tarafından kaleme alınan bu makalede tek bir akışkan yerine bir karışımın konu edilmesi dikkate değerdir.

Oldukça yeni bir çalışma olan “Düşük ve orta seviyeli ısı akıları etkisinde saf akışkanların çekirdekli buharlaşması” konulu makale, Benjamin ve Balakrishnan tarafından ortaklaşa hazırlanmış ve 1996 yılında yine aynı dergide (Int. Jr. of Heat & Mass Tr.) yayınlanmıştır [11]. Su, aseton, n-hexan gibi saf akışkanlar ele alınsa da düşük ve orta dereceli ısı akıları altında buharlaşma problemine bir yaklaşım tarzı belirlemekte faydalı olacağı düşünülmektedir tez kaynaklarına dahil edilmiştir.

ASME Journal of Heat Transfer dergisinde çıkan ve 1990 tarihini taşıyan bir makalede ise Freon 22 nin 12.7 mm çaplı ve mikro kanatçıklı borular içinde buharlaşma ve yoğunlaşması ve bu andaki basınç düşümüne ilişkin araştırmalar Schlager, Pate ve Bergles tarafından kaleme alınmıştır [10]. Bu çalışma, teoriden kısaca bahsetmekle beraber tamamıyla deneysel niteliklidir.

Bu teze konu teşkil eden faz değişiminin söz konusu hallerdeki ısı geçişi problemlerinin çözümü için bir metod öne süren ve Frederick ve Greif

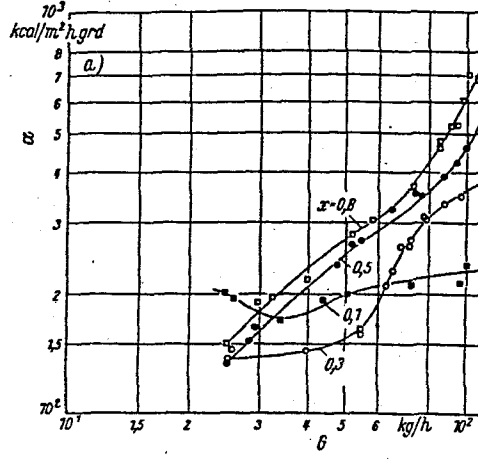
tarafından hazırlanan bir çalışma, 1985 tarihinde ASME Journal of Heat Transfer adlı uluslararası bilim dergisinde yer almıştır [9]. Bu makalede söz konusu olan faz değişimi katı-sıvı arasında olmakla beraber temel yaklaşım mantığı benzer olduğundan kaynak olarak seçilmiş ve bu çalışmaya dahil edilmiştir.

Wen ve Hsieh tarafından hazırlanarak 1994 yılında International Journal of Heat and Mass Transfer dergisinde yer alan bir makalede, Freon 114'ün buharlaşması sırasında kanatçıklı borularda ısı geçişi ve ısı geçişini iyileştirme konu alınmıştır [8]. Temel amaç olarak ısı geçişinin artırılmasında kanatçık kullanılmasının etkisinin ne olduğunun tartışıldığı bu çalışma deneysel temellidir. Direkt olarak tezle ilgisi olmamakla beraber, Freon 114 ve benzeri akışkanların buharlaşma karakteristiklerinin gayet iyi bir şekilde görülmesini sağlayan bir çalışma olduğundan önemlidir.

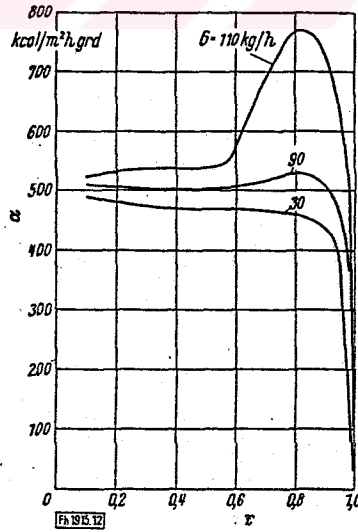
Yine International Journal of Heat and Mass Transfer adlı dergide yayınlanan ve Choi, Young Cho ve Lorsch tarafından yazılan bir diğer makalede, dairesel kesitli bir boru içindeki türbülanslı akış halindeki sıvı-katı karışımlarının faz değişimi esnasındaki zorlanmış ısı taşınımı ele alınmaktadır [7]. 1994 tarihli bu çalışmada, belirli oranlardaki su-buz karışımlarının kullanılması ile akışkanın ısı kapasitesinin değiştirilmesi yoluyla ısı taşınımının artırılması metodu incelenmektedir. Yine deneysel içerikli olan bu makale, belki de konuyla en alt düzeyde ilişkili olmasına karşın, modelin belirli bir ölçüde tez konusuna benzemesi ve daha çok ileride tezin genişlemesi muhtemel olan yönde olması kaynaklar arasına son olarak olsa da katılmasına neden olmuştur.

Bu tezin hazırlanmasında faydalanılan makaleler haricindeki kaynaklar da aslında konu ile ilgili olarak daha önceden yapılmış çalışmalar gibi görülebilir. Ancak özel olarak bir konu ele alınmadığı için daha çok kitap şeklinde olan bu kaynaklar, farklı bölümlerde ele alınmıştır.

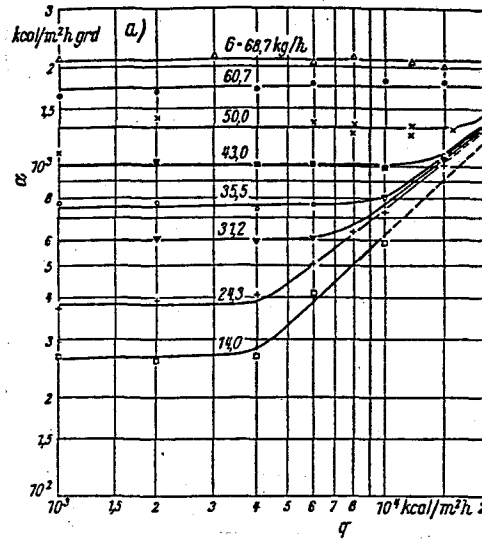
Chawla tarafından yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar ışığında çizilen grafikler yardımıyla ısı taşınım katsayısının çeşitli parametrelere göre nasıl değişmesi gerektiği aşağıda görülmektedir.



Şekil 9.1 Debi-ısı taşınım katsayısı değişimi [2]



Şekil 9.2 Kuruluk derecesi-ısı taşınım katsayısı değişimi [2]



Şekil 9.3 Isı akısı-ısı taşınım katsayısı değişimi [2]

BÖLÜM 10

ÇALIŞMANIN AMACI, YAPISI VE SINIRLARI

Bu tezde özetlenen çalışmanın temel amacı, yatay durumdaki boru içinde buharlaşarak akan bir soğutucu akışkanın söz konusu olduğu durumda ısı taşınım katsayısının sistemin çeşitli parametrelerine göre değişimini tespit edecek bir teorinin elde edilmesidir.

Daha sonra ayrıntılı olarak açıklanacağı üzere, ortaya çıkan sonuçlar yalnızca Freon 11 için geçerli olabilecek bir ifadeye ulaşmaktadır.

Teorinin kurulmasında geçerli olan kabuller ve kullanılan yöntemler de tamamen yakın konular üzerinde geçmişte yapılmış ve amacı da bu teze yakın olan çalışmaların sonuçları göz önüne alınarak tespit edilmiştir.

Öncelikle, elde edilmeye çalışılan ifade, olayın matematiksel çözümünden çok fiziksel yorumuna dayandırılmıştır. Bunun için de daha önceden bu ve buna benzer konularda yapılmış olan bir miktar çalışmanın içinden konu ile yakından alakalı olanlar seçilmiş ve bunlarda yer alan deney sonuçlarından yola çıkılmıştır.

Freon 11 kullanılan başka bir deneyi konu alan herhangi bir makale bulunmadığından, kimi sadece buharlaşmayı, kimi ısı akısı etkisini, kimisi de yoğuşmada ısı geçişini ele alan çok sayıdaki farklı yazarların kaleminden çıkmış çalışmalar birleştirilerek genel bir yaklaşım tarzı belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada da bir önceki maddede sayılan makale ve yayınların izlediği yol aynen muhafaza edilmiştir. Mevcut deneysel verilerin kullanılacak ve bundan faydalanarak bir teorinin çıkarılmaya çalışılacak olması nedeniyle, akışkan olarak sadece Freon 11 kullanılarak yapılan deneylere ait sonuçlar göz önüne alınmıştır [2]. Daha geniş bir çalışma mümkün olmakla birlikte bunun yüksek lisanstan ziyade bir doktora tezine

konu teşkil edebilecek yapıda olması sebebiyle çalışmaya bazı sınırlar koymak kaçınılmaz olmuştur.

Önceden benzer konularda yapılan çalışmalarda izlenen matematiksel yöntemler yapıcı aynı fakat ayrıntıda farklı olmak üzere aynen kullanılmıştır. Bundaki amaç, tamamen yeni ve bilinmeyen bir teorinin varlığını kabul ederek ilerlemek yerine mevcut temeller üzerinde teoriyi ilerletmektir. Gerek matematiksel ve gerekse de verilerin yorumlanmasına dayanan fiziksel değerlendirmelerde göz önüne alınan en önemli kriter, elde edilecek ifadenin bahis konusu akışkanın mümkün olan tüm şartlarda sistemdeki parametrelerin değişimine vereceği cevabı tespit etmektir.

Başlangıçta belirlenen sınırların mümkün olduğunca içinde kalmak suretiyle yürütülen çalışmalarda, öncelikle geçmişte benzeri konudaki çalışmalarda rastlanan büyük sapmaların ve tuhaf sonuçların üzerinde durulmuştur. Bu sayede, elde edilen yeni ifadelerin eskilere oranla daha sağlıklı sonuçlar vermesine ve dolayısıyla daha güvenilir olmasına gayret edilmiştir.

Teze temel teşkil edecek olan makale, Chawla tarafından 1967 yılında yayınlanan çalışmadır [2].

Mevcut deney sonuçlarından yola çıkılarak teoriye ulaşmak ana amaç olduğundan gerekli görülen yerlerde ihmal ve kabuller yapılmış, ancak bunların olayın doğasını bozmayacak ölçüde ve yapıda olmasına da özellikle dikkat edilmiştir.

Bu nedenle elde edilen sonuçlarda belirli oranda gerçek halden sapma olacağı söylenebilir. Ancak bunları mümkün olduğunca düşük seviyede tutmak ve bağıntıyı elden geldiğince genelleştirmek için, çözümü imkansız kılmayacak sayıda parametre hesaba dahil edilmiştir. Hesaba girmeyen veya ihmal edilecek derecede önemsiz bulunan parametrelerin sonuca fazlaca bir etkisi olmayacağı rahatlıkla iddia edilebilir.

Yine de gerekli görüldüğü takdirde bunları da hesaba katacak ayrı teorilerin bu çalışmadan yola çıkarak elde edilebilmesi mümkündür.

Örnek olarak, yapay olarak borunun pürüzlülüğünün arttırılması, hatta pim veya kanatçıklar ilave edilmesi sonucunda ısı geçişindemeydana gelecek artışın burada öncelikli olmadığı için ihmal edildiğini, fakat başka uygulamalarda kanatçık veya pimlerin etkisinin bu tezde varılan sonuç bağıntısına fazla zorluk çekmeden eklenebileceği açıktır.



BÖLÜM 11

ADI GEÇEN YÖNTEMLERİN TANITIMI

Çalışmada denenen matematiksel yöntemler genel olarak herhangi bir doğa olayının teorisini belirlemede kullanılan temel bağıntı tiplerinden bir kısmı seçilerek oluşturulan bir program aracılığı ile mevcut duruma uyarlanmıştır.

Programda adı geçen çok sayıdaki yöntem çeşitli gruplar altında toplanmış halde sunulmaktadır. Bu grupta, bağıntıların genel karakteristiklerine göre yapılmaktadır.

Temel olarak kullanılan gruplar 8 ayrı kategoride incelenebilir:

1. Polinomlar
2. Üstel fonksiyonlar
3. Kuvvet serileri
4. Yoğunluk modelleri
5. Artım modelleri
6. Sigmoidal modeller
7. Çeşitli fonksiyonlar
8. Özel fonksiyonlar

Bu gruplar da kendi içlerinde alt kategorilere ayrılmaktadır. Kısaca değinmek gerekirse:

1. Polinomlar
 - Lineer
 - İkinci dereceden
 - n inci dereceden
2. Üstel fonksiyonlar
 - Üstel
 - Düzeltilmiş üstel

- Logaritmik
- Ters logaritmik
- Buhar basıncı modeli

3. Kuvvet serileri

- Kuvvet fonksiyonu
- Düzeltilmiş kuvvet fonksiyonu
- Kaydırılmış kuvvet fonksiyonu
- Geometrik
- Düzeltilmiş geometrik
- Kök modeli
- Hoerl modeli
- Düzeltilmiş Hoerl modeli

4. Yoğunluk modelleri

- Ters
- Ters ikinci dereceden
- Bleasdale
- Harris

5. Artım modelleri

- Doyma-artım modeli
- Üstel bağıntı 2
- Üstel bağıntı 3

6. Sigmoidal modeller

- Gompertz
- Mantık
- Richards
- MMF
- Weibull

7. Çeşitli modeller

- Hiperbolik
- Sinüsoidal
- Isıl kapasite

- Gauss modeli
- Rasyonel fonksiyon

8. Özel fonksiyonlar

- Bacon-Watts çift çizgi
- Bent hiperbol modeli
- BET modeli
- Beta dağılımı
- Cauchy modeli
- Chapman-Richards
- Freundlich modeli (genişletilmiş)
- Gamma modeli
- Genelleştirilmiş hiperbol modeli
- Gunary
- Ters model
- Langmuir modeli (genişletilmiş)
- Doğal logaritma
- Lorentz eşitliği
- Üslerin toplamı
- Kesilmiş Fourier serisi
- İki parametrelili çan

Adı geçen yöntemlerin çoğu matematik ile ilgisi olanların sık sık adını duyduğu ifadeleri kullanan metodlardır. Son grup bunun haricinde tutulabilir. Zira o grup, normal ifadelerin yetersiz kaldığı veya olayın fiziksel yapısını uygun şekilde yansıtamadığı için özel olarak tespit edilmiş bulunan ifadelerden oluşmaktadır. Bunların pek çoğu hayli karmaşık ve alışılmamış bağıntılardır.

Bu yöntemlerin daha ayrıntılı açıklaması ekler bölümünde yer almaktadır.

Elbette ki bu yöntemlerin hepsinin birden sisteme uyması beklenemeyeceğinden, genel yapı itibarıyla probleme en uygun sonucu veren gruplar tercih edilmiştir. Bundan önceki çalışmalarda elde edilen

sonuçlar ve deneylerin sonuçları çizilerek ortaya çıkarılan grafikler, küçük bir takım istisnalar haricinde bulunulmaya çalışılan ifadenin genel yapısı hakkında yeterince aydınlatıcı bilgi vermiştir.

Isı geçişi ile alakalı mevcut deney sonuçlarından faydalanarak teori oluşturmaya dayalı problemlerin çoğunda ilk adım olarak sistem parametrelerinin boyutsuz sayılar cinsinden ifade edilmesine çalışılmaktadır. Bu, hesabı kolaylaştırıcı etki yapmaktadır.

Bulunacak olan ifadede sadece boyutsuz sayılar kullanılmasının getireceği rahatlık düşünülerek deneylerde elde edilen ısı taşınım katsayısı değerleri hemen Nusselt sayıları haline getirilmiş ve daha sonra seçilen yöntemin uygulanmasına geçilmiştir.

Kimi hallerde, yukarıda adı geçen yöntemlerden bir tanesi diğerlerine küçümsenemeyecek bir üstünlük sağlamıştır. Başka bir veri grubunda ise aynı denklem pek çok kez ıraksamış veya kabul edilebilir sınırların dışında kalan sapmalar vermiştir.

Bu nedenle, bir veri grubuna uyan ifade hemen uygulanmamış, mevcut tüm veri gruplarına toplamda en uygun görünen ifadenin kullanılması tercih edilmiştir.

rnek vermek gerekirse, seçilen yöntem olan kuvvet serisi yerine ilk çalışmalar esnasında tespit edilen ve diğer yöntemlerin çoğuna bariz ölçüde üstünlük sağlayan MMF modeli, veri gruplarının bir yerinden sonrakilerde aşırı sapmalar göstermiştir. Kimi gruplarda neredeyse yüzde yüzlük bir yaklaşım elde edilirken, kimi gruplarda hata oranı hesaplamanın dahi olanaklı olmadığı tuhaf sonuçlar çıkmış, hatta ıraksamalar nedeniyle bağıntı bile bulunamamıştır.

Yöntemlerin bir kısmının fiziksel bazı olayların matematiksel olarak modellenmesi sonucu ortaya çıkan ifadelere dayandığı düşünülecek olursa (ki buna en iyi örnekler ısı kapasite ve buhar basıncı modelleridir) neden değişen parametreler sonucunda elde edilen değerlerin deney sonuçlarından sapma miktarının artma eğilimi gösterdiği daha kolay anlaşılabilir.

Diğer yandan, özel yöntemler olarak adlandırılan kısımda adı geçen fonksiyonların çoğunun yalnızca anlık ihtiyaçlara cevap verecek şekilde tasarlanmış oldukları unutulmamalıdır. Sözelimi, Sinüsoidal modelin ışığın dalga boyuna ilişkin bir hesap söz konusu olduğunda gayet etkin bir şekilde kullanılabileceği şüphesizdir. Bununla beraber aynı bağıntının sözelimi bir düzgün doğrusal hareket deneyine ait sonuçlara uygulanması matematiksel olarak belki mantıklı sonuçlar verse de fiziksel olarak gerçekte ilgisi olmayan gariplikler gösterecektir.

Benzer mantıkla, kullanılan parametrelerin belirli değerleri için gayet iyi sonuçlar veren özel ifadeler bulunabilir. Fakat yukarıda da belirtildiği üzere (MMF modelinde olduğu gibi) bu tip yaklaşım hem bir genellemeyi olanaksız kılmakta ve hem de ısı geçişinin doğasına aykırı düşmektedir.

Bu tezin hazırlandığı döneme kadar yapılan pek çok çalışmada izlenen yöntemler az çok aynı temele dayanmakta olduğu için, probleme konu olan haldeki ısı geçişini en iyi temsil edecek olan bağıntı tipi de bir tür harmanlama ile elde edilmiştir.

BÖLÜM 12

SEÇİLEN YÖNTEMİN UYGULAMASI

Daha önceden bu teze benzer konularda ve korelasyon işlemleri içeren makale ve çalışmalara dayanarak herhangi bir özel metod yerine daha genel yaklaşımlar tercih edilmiştir.

İlk çalışmalarda MMF modeli gayet güzel ve düşük sapmalı sonuçlar vermişse de bunun sadece belirli veri grupları için geçerli olduğu farkedilerek diğer metodlara yönelinmiştir.

MMF modelinin ilk gruplarda verdiği sonuçlar incelendiğinde, benzer sonuçları verebilecek, fakat tamamen farklı yapıda metodların varlığı tespit edilmiştir. Bunların bir kısmı MMF gibi Sigmoidal model tipinde olduğundan ve bu model ısı geçişini yeterince iyi yansıtmadığından değerlendirme dışında bırakılmıştır.

Benzer mantık kullanılarak diğer gruplarda yer alan bağıntı tiplerinin çoğu elenmiş ve neticede iyi sonuç veren az sayıda bağıntıya ulaşılmıştır.

Bu bağıntılar kendi aralarında gruplanarak tek tek bütün gruplara uygulanmış ve toplamda en iyi yaklaşımı sağlayan yöntem tercih edilerek hesaba onunla devam edilmiştir.

Kuvvet fonksiyonu olarak anılan ve genel yapısı:

$$y = ax^b \quad (12.1)$$

şeklinde olan bir bağıntının hemen hemen her grup için kafi derecede yaklaşık sonuç verdiği gözlemlendiğinden, hesaplamalarda bu bağıntı kullanılmıştır.

Elbette ki bu bağıntıda yer alan parametre ve değişkenler olduğundan biraz farklı bir şekle sokulmuş ve probleme uygun hale getirilmiştir. Bunun hesap kolaylığı sağladığı hatırlatılır.

Örnek vermek gerekirse, normal olarak h ile gösterilen ısı taşınım katsayısının hesaplandığı bir bağıntının:

$$h = f(G, q, x, d, t) \quad (12.2)$$

şeklinde olması beklenirken, boyutsuzlaştırma ve probleme uygun hale getirme işlemleri sonucunda bağıntı biraz değişerek:

$$\frac{hd}{k_s} = Nu = f\left(\frac{qd}{k_s t}, \frac{\rho_b}{\rho_s}, \frac{v_s}{\alpha_s}\right) \quad (12.3)$$

gibi bir boyutsuz sayılar tarafından oluşturulan bir hale gelmiştir [3].

Sağ taraftaki boyutsuz sayılar aslında tamamen ısı geçişi kanunları göz önüne alınarak yazılmış ifadelerden ibarettir.

Bu bağıntıda ısı akısı sağ tarafın ilk teriminde, boru çapı hem sol ve hem de sağdaki terimlerde, doyma sıcaklığı sağ taraftaki ilk terimde yer almaktadır.

Debi ve kuruluk derecesi ilk bakışta bağıntıda yokmuş gibi görünse de gerçekte ortadaki yoğunlukların oluşturduğu terimin içinde yer almaktadır. Bunu açıklamak gerekirse, iki fazlı bir akış için eşdeğer bir debi tanımının yapılması yerinde olur [3].

$$G_{eş} = G \left[(1-x) + x \left(\frac{\rho_s}{\rho_b} \right)^{1/2} \right] \quad (12.4)$$

Buradaki eşdeğer debi, iki fazlı akışın cidarda yarattığı kayma gerilmesine eşdeğer sonuç veren sıvı akışının değeridir. Genel olarak bu tip problemlerde kullanılan yöntem budur.

Ancak tez konusu halde var olan bir takım farklılıklar durumu değiştirmektedir. Bu değişme, problemi nispeten kolaylaştırıcı yönde gerçekleşmektedir.

Açıklamak gerekirse, probleme temel oluşturan deneylerin hepsinin sabit doyma sıcaklığında yapılmış olması, akışkanın sıvı ve buhar fazının fiziksel özelliklerinin sabit kalmasına ve her durum için hesaba aynı şekilde girmesine yol açmaktadır. Genel ifadenin sağ tarafında yer alan son terim, akışkana ait kinematik viskozitenin yine akışkana ait ısı yayılım katsayısına bölünmesi ile elde edildiğinden bütün hesaplamalarda aynı ve sabit değeri korumakta ve ihmal edilebilmektedir.

Buna benzer bir durum da boru çapı için geçerlidir. Göz önüne alınan deney gruplarının her birinde çap sabit kalmakta ve bu nedenle de probleme etki eden bir parametre olmaktan çıkmaktadır. Elbette ki boyutsuz sayıların hesaplanmasında boru çapı da işin içine girmektedir ancak değeri sabit kaldığından sanki boyutlu bir rakam gibi düşünülebilmektedir.

Yukarıda yapılan kabuller ışığında bir kısım parametreler elendikten sonra geriye ısı akısı, kuruluk derecesi ve debi kalmaktadır. Tabii bu da problemi oldukça basitleştirmektedir.

Üç değişkenin her birinin ayrı ayrı değerlendirmesi yapıldıktan sonra birleştirilmesi ve sonuca gidilmesi daha uygun olacağından, ısı akısı, debi ve kuruluk derecesi ayrı ayrı incelenmiş ve elde edilen sonuçlar en sonda bir araya getirilerek genel ve sapması mümkün olan en az seviyede kalan tek bir bağıntıya ulaşılmıştır.

Bağıntının genel yapısı tespit edildikten sonra ilk olarak ısı akısı değişkeni olarak kabul edilmiş ve deney sonuçları debi ve kuruluk derecesinin sabit kaldığı, bunun yanında ısı akısının değiştiği veri grupları oluşturacak şekilde yeniden düzenlenmiştir.

Bu şekilde elde edilen denklemin sabit katsayıları aslında içinde debi ve kuruluk derecesini içeren ifadeler olduğundan ikinci adım olarak bu katsayıların her birinin sabit ısı akısı ve kuruluk derecesinin söz konusu olduğu hallerde debiye bağlı olarak nasıl değiştiği tespit edilmiştir. Yani, katsayıları veren ve sadece debiye bağlı olup kuruluk derecesini bir parametre olarak içinde barındıran ikinci bir bağıntı elde edilmiştir.

Son adımda da bu ikinci bağıntıyı meydana getiren ifadede yer alan terimlerin değerinin sadece kuruluk derecesine bağlı olarak tespitine yönelinmiştir.

Bundan sonra elde edilen üç ayrı sonuç, genel denklemin içinde toplanmış ve ortaya tek ve büyük bir bağıntı çıkmıştır.

Denklemin en genel hali şöyledir:

$$Nu = 2303.626x^{0.287} \left(\frac{G}{G_0} \right)^{0.649} \left(\frac{qd}{k_s t_d} \right)^{0.212} \quad (12.5)$$

BÖLÜM 13

SONUÇLAR VE İRDELEME

Bu çalışmada elde edilen sonuç bağıntısını bir kez daha hatırlatarak başlarsak:

$$Nu = 2303.626x^{0.287} \left(\frac{G}{G_0} \right)^{0.649} \left(\frac{qd}{k_s t_d} \right)^{0.212} \quad (13.1)$$

Yapılmış bulunan deneylerin sonuçlarında elde edilen değerler, aynı parametreler bu bağıntıya konularak matematiksel işlemler kullanılarak ulaşılan teorik sonuçlarla karşılaştırıldığı zaman ortaya şöyle bir tablo çıkmaktadır:

- * Teorik ifadenin ortalama sapması % 17.82 dir.
- * Teorik ifadenin en büyük sapması % 130.25 dir.
- * En küçük sapma ise % 0.10 dir.

Bu sonuç, bir teorik çalışma için oldukça iyi sayılabilir. Zira elde edilen genel denklem, kuruluk derecesi, debi veya ısı akısının değiştirilmesi halinde de kullanılabilmektedir. Bu yapıldığı zaman hata yüzdesi kabul edilebilir bir sınır olan % 20'nin altında kalmaktadır.

Her ne kadar elde edilen sonuç oldukça iyi bir yaklaşıma sahipse de pratikte ancak öngörülmüş olan hallere uygulanabileceği önemle hatırlatılır.

BÖLÜM 14

ÖNERİLER

Bu tezde elde edilen sonuçlar oldukça iyi olduğundan aslında bir iyileştirme beklenemez denilebilir ama yine de daha çok sayıda parametreyi göz önüne alan ve daha hassas olmasa da daha genel sonuç veren bir denklem üzerinde çalışılabilir.

Böyle bir çalışma için düşünülebilecek ilk parametreler boru iç yüzeyinin pürüzlü olması hali olabilir. Veya, boru içerisinden akış halinde basınç kaybına bağlı ifadelerin daha hassas denklemler kullanılarak çıkarılması düşünülebilir. Bu çalışmada basınç kaybına ilişkin bir bağıntı çıkarılmamış olmasına rağmen Chawla ve onu izleyen bazı araştırmacıların bu konu üzerinde yoğunlaşma eğilimi gösterdikleri gözlenmektedir [2,10].

Soğutucu akışkan olarak Freon 11 kullanılmış olmasının getirdiği bazı dezavantajlar (mesela günümüzde kullanımının yasaklanmış olması) düşünülerek buna benzer denklemlerin farklı akışkanlar veya akışkan karışımları için bulunması bir devam çalışması olabilir.

O zaman en büyük problemlerden birisi akışkanların karışımı söz konusu olduğunda oranların ısı taşınımına yapacağı etkinin tespit edilmesidir.

Farklı geometriye sahip boruların yer aldığı uygulamaları temsil edecek çalışmalar da mümkün olmakla birlikte çoğu kez sadece bir düzeltme katsayısı bulmaktan öteye gidilemeyeceği kesin olmamakla beraber kuvvetle muhtemel olduğundan bu tip bir çalışma, ancak diğer bir çalışmanın alt problemi olarak kullanılabilir.

Yukarıda adı geçen hallerin tek tek söz konusu olması yanında aynı anda birden fazlasının bulunduğu durumlar da birer devam çalışmasına zemin teşkil edebilecek konular arasında yer almaktadır.

Bu teze devam niteliği taşıyacak, fakat konu olarak oldukça farklı gibi görünen bir başka seçenek de yoğuşma olayının söz konusu olduğu haller olabilir. Hatta faz değişiminin hangi yönde nasıl gerçekleştiğinin bulunabilmesi açısından bu çalışmanın oldukça faydalı olacağı da şüphesizdir.

Dar bir borunun içerisindeki akım halinde bir taraftan ısı çekilirken diğeryandan ısı verilmesi ile oluşan durum da ilgi çekicidir. Oldukça dar bir alan içerisinde hem yoğuşma ve hem de buharlaşma olması halinde rastlanabilecek bu durum mesela otomobil radyatörleri gibi yerin sınırlı ve soğutma ihtiyacının büyük olduğu yerlerde özel önem kazanmaktadır.

Akışkanın yanı sıra, içinde akmakta olduğu kanal veya borunun da hareketli olmasına ilişkin problemler de çözülmeyi beklemektedir. Merkezkaç kuvvetler ve Coriolis kuvvetleri gibi etkiler altında akışkanın buharlaşma ve yoğuşma karakteristiklerinin incelenmesi güzel bir konu olarak kabul edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] DAĞSÖZ Alpin Kemal, Isı Geçişi 5. baskı. Alp yayınları, (1993).
- [2] CHAWLA Jogindar Mohin, Waermeübergang und Druckabfall in waagerechten Rohren bei der Strömung von verdampfenden Kaeltemitteln. VDI-Forschungsheft 523, VDI-Verlag Düsseldorf Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, (1967).
- [3] YANG C-Y., WEBB R.L., Condensation of R 12 in small hydraulic diameter extruded aluminium tubes with and without micro-fins. Int. Jr. of Heat and Mass Tr., Vol. 39 No.4, pp.791-800, (1996).
- [4] STEPHAN Karl, AURACHER Hein, Correlations for nucleate boiling heat transfer in forced convection. Int. Jr. of Heat and Mass Tr., Vol. 24, pp.99-107, (1981).
- [5] SHAH M.M., A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes. Int. Jr. of Heat and Mass Tr., Vol. 22, pp.547-556, (1979).
- [6] SHEKRİLADZE I.G., Developed boiling heat transfer. Int. Jr. of Heat and Mass Tr., Vol. 24, pp.795-801, (1981).
- [7] CHOI Eunsoo, CHO Young I., LORSCH Harold G., Forced convection heat transfer with phase-change-material slurries: Turbulent flow in a circular tube. Int. Jr. of Heat and Mass Tr., Vol. 37 No.2, pp.207-215, (1994).
- [8] WEN Mao-Yu, HSIEH Shou-Shing, Evaporative heat transfer and enhancement performance of rib-roughened tube annuli with refrigerant 114. Int. Jr. of Heat and Mass Tr., Vol. 37 No.3, pp.425-436, (1994).
- [9] FREDERICK D., GREIF R., A method for the solution of heat transfer problems with a change of phase. ASME Jr. of Heat Tr., Vol. 107, pp.520-526, (1985).
- [10] SCHLAGER L. M., PATE M. B., BERGLES A. E., Evaporation and condensation heat transfer and pressure drop in horizontal, 12.7 mm microfin tubes with refrigerant 22. ASME Jr. of Heat Tr., Vol. 112, pp.1041-1047, (1990).
- [11] BENJAMIN R. J., BALAKRISHNAN A. R., Nucleate boiling heat transfer of pure liquids at low to moderate heat fluxes. Int. Jr. of Heat and Mass Tr., Vol. 39 No.12, pp.2495-2504, (1996).
- [12] TAKAMATSU Hiroshi, MOMOKI Satoru, FUJII Tetsu, A correlation for forced convective boiling heat transfer of nonazeotropic refrigerant mixture of HCFC22/CFC114 in a horizontal smooth tube. Int. Jr. of Heat and Mass Tr., Vol. 36 No.14, pp.3555-3563, (1993).

EKLER

Ek A - Yöntemlerin ayrıntılı incelemesi

Ek B - Seçilen yöntemin irdelenmesi

Ek C - Veriler

Ek D - Sonuçlar

Ek E - Grafikler



Ek A - Yöntemlerin ayrıntılı incelemesi

Polinomlar

*Lineer hal:

Bu hal, herkesin gayet iyi bildiği doğrusal yaklaşımdan başka bir özelliği olmayan haldir. Doğrusal yaklaşım hemen hemen bütün deney sonuçlarına uygulanabilen bir metod olmakla beraber, çoğu kez elde edilen sonucun deneysel verilerle karşılaştırılması neticesinde sapmaların daha yüksek olarak ortaya çıktığı bir yaklaşımdır.

$$y = a + bx \quad (A.1)$$

genel ifadesine sahip olan metodda, x ve y bağımsız değişkenler iken a ve b deney sonuçlarına göre hesaplanan birer sabit katsayı olmaktadır. Ancak hemen belirtilmelidir ki, burada sabit olarak anılan büyüklükler yalnızca tek bir deney grubu veya parametre grubu için gerçekten sabit değerdedir. a ve b katsayılarının değerleri gruptan gruba değişebilir.

*İkinci dereceden polinomlar:

$$y = a + bx + cx^2 \quad (A.2)$$

ifadesi ile belirli olan bu metod, yine gayet iyi bilinen ikinci dereceden parabolleri temsil eden bir ifadeye dayanmaktadır. Bağımsız değişkenler daha önce olduğu ve bundan sonra da aynen olacağı gibi x ve y olup, denklemin yapısı gereği üç adet sabit katsayı içeren bir bağıntıda beraberce bulunmaktadır. Sabit teriminden ne anlaşıldığı bir önceki metodda açıklanmıştır.

*n inci dereceden polinomlar:

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + \dots \quad (A.3)$$

gibi bir bağıntı ile belirlenen n inci dereceden polinomlar da yapı olarak 2. Dereceden polinomlarla aynı olup matematikten bilinen yöntemlerle kolayca çözülebilirler.

Üstel fonksiyonlar

*Üstel fonksiyonlar:

Üstel fonksiyonlar yapı olarak bundan öncekilerden farklı olmasına rağmen matematiksel açıdan hesabı izafi olarak kolay fonksiyonlardır. Genel ifadesi

$$y = ae^{bx} \quad (A.4)$$

olan üstel fonksiyonlar eksponansiyel olarak da anılırlar. İçinde geçen e sayısı, ki bu da matematikte π ile birlikte en çok karşılaşılan sabitlerdendir, metoda adını vermektedir. Bağımsız değişkenler yine aynıdır, fakat sabit değer yalnızca a ve b olarak görünmektedir.

Bu methoda elde edilen ifadeler çizildiğinde a ve b nin değerine bağlı olarak sürekli artan bir fonksiyon elde edilebilir. a parametresi pozitif iken asla x ekseninin altına inmeyen bu fonksiyon, eğim olarak azalan bir artmaya sahiptir.

*Düzeltilmiş üstel

Üstel fonksiyon veya eksponansiyel olarak anılan metodun biraz değiştirilmesi ile elde edilen bu methodda x serbest değişkeninin yerini $1/x$ değişkeni almıştır. Bunun dışındaki bütün özellikleri bir önceki maddede incelenen hal ile aynıdır.

$$y = ae^{b/x} \quad (A.5)$$

*Logaritmik

$$y = a + b \ln x \quad (A.6)$$

genel ifadesi ile verilen logaritmik fonksiyonlarda geçen $\ln$ terimi doğal logaritmaya işaret etmektedir. Doğal logaritma, 10 yerine e sayısı taban olarak alınan bir logaritma işleminden ibaret olup bu özelliği ile bir tür ters eksponansiyel işlemi içerdiğinden dolayı bu gruba dahil edilmiştir.

Fonksiyonun yapısı gereği, ki $\ln x$ ifadesinin reel eksen takımı söz konusu olduğunda asla sıfırın altındaki x değerleri için tanımlı olmadığı hatırlatılır, y değerlerinin tamamı pozitif x tarafında yer almaktadır.

*Ters logaritmik

Düzeltilmiş üstel fonksiyon ile benzer özellikler gösteren bu bağıntı tipinin normal logaritmik fonksiyondan farkı

$$y = \frac{1}{a + b \ln x} \quad (\text{A.7})$$

ifadesinden de görüleceği gibi ters çevirme işlemi yapılmasından ibarettir. Bu halde ek olarak gelen tek kısıtlama paydada yer alan değer x 'in sıfıra eşit olmaması gerekliliğidir.

*Buhar basıncı modeli

Gerçek olaylar baz alınarak türetilen denklemlerden birisi olan buhar basıncı modeli de içerisinde eksponansiyel işlemi içerdiğinden bu gruba dahildir. Genel ifadesi

$$y = e^{a + \frac{b}{x} + c \ln x} \quad (\text{A.8})$$

şeklinde olup yine x değerinin sıfır veya daha küçük değerleri için tanımsızdır. Üç adet parametre içeren bu denklem, y eksenine asimptotik olarak yaklaşmaktadır. Pozitif b ve c değerleri için artı sonsuzda y eksenine ile kesişmektedir.

Kuvvet serileri

*Kuvvet fonksiyonu

Aslında temel olarak bakıldığında polinom tarzında denklemlerin bu tip denklemin alt gruplarında yer aldığı söylenebilir. Bunun nedeni, bağıntının genel halinde, ki o da şu şekildedir

$$y = ax^b \quad (\text{A.9})$$

yer alan a ve b sabitlerinin belirli değerleri için bir lineer veya ikinci veya n inci dereceden bir polinom ile benzer özelliklere sahip olmasıdır. Aradaki en

büyük fark, polinom cinsi yaklaşımlarda üs olarak görünen değerin sabit ve önceden bilinen ve bir gruptan diğer gruba geçerken değiştirilmesi mümkün olmayan tamsayılardan oluşurken bu halde bu değerin herhangi bir reel sayı olarak alınabilmesidir.

*Düzeltilmiş kuvvet fonksiyonu

$$y = ab^x \quad (\text{A.10})$$

ifadesi ile belirli olan bağıntı, yapı olarak aslında kuvvet fonksiyonundan hayli farklıdır. Serbest değişkenin bir üs olarak yer aldığı bu tür denklemler, b ve a sabitlerinin özel değerleri için eksponansiyel fonksiyonlara daha çok benzemektedirler. Sözgelimi b sabitinin 2.718 gibi e sabitine yakın değerleri için bu metod yardımıyla çizilen bir eğri, gerçek eksponansiyel fonksiyon kullanılarak çizilen fonksiyon ile çakışma eğilimi göstermektedir.

*Kaydırılmış kuvvet fonksiyonu

Bu methodda yer alan kaydırılmış sözcüğü, normal kuvvet fonksiyonu ile farkını belirtmek amacıyla kullanılmaktadır.

$$y = a(x - b)^c \quad (\text{A.11})$$

şeklindeki fonksiyona dikkat edilecek olursa, b değerinin sıfıra eşit olduğu hallerde tam olarak kuvvet fonksiyonu haline dönüştüğü görülebilir. Başka bir deyişle bu metodun temel bağıntısı, b kadar ötelenen veya kaydırılan bir kuvvet fonksiyonundan başka bir denklem değildir.

*Geometrik

Bu metod yapı olarak tamamen farklı bir çizgidedir. Hem üs olarak ve hem de normal terim olarak bir serbest değişken bulunduran bu fonksiyonun genel yapısı şu şekildedir:

$$y = ax^{bx} \quad (\text{A.12})$$

Daha öncekilerden hiç birine benzemeyen bu ifade ancak özel hallerde geçerli olabilmekte ve x serbest değişkeninin küçük (örnek olarak sıfır ile bir değerleri arasında) hayli küçük değerler almaktadır. Bunun tersi

de geçerli olup, x serbest değişkeninin büyük değerlerinin söz konusu olduğu hallerde de oldukça büyük değerler almaktadır. Elbette ki bu karşılaştırma a ve b parametrelerinin aynı ve sabit değerleri için yapılabilir.

***Düzeltilmiş geometrik**

Bu model, daha önce adı geçen diğer düzeltilmiş yöntemlerle benzerlikler içermektedir. Şöyle ki, üs kısmında yer alan x serbest değişkeni yerine düzeltilmiş eksponansiyel halinde olduğu gibi $1/x$ gelmiş ve ifade şu hale dönüşmüştür:

$$y = ax^{b/x} \quad (A.13)$$

Bunun bir öncekine göre ek kısıtı x serbest değişkeninin sıfır değerini alması halinde denklemin reel düzlemde tanımsız hale gelmesidir. Başkaca önemli bir farkı bulunmamaktadır.

***Kök modeli**

$$y = ab^{1/x} \quad (A.14)$$

ifadesi ile verilen bu metotta serbest değişken yine üste yer almaktadır. Daha öncekinde olduğu gibi burada da x serbest değişkeninin sıfır değerini alması halinde bağıntı tanımsız hale gelmektedir.

***Hoerl modeli**

Hoerl modeli yapı olarak bu grupta yer alan diğer bağıntıları andırmaktadır ve genel ifadesi

$$y = ab^x x^c \quad (A.15)$$

şeklindedir. Dikkat edilirse burada serbest değişken aynı anda kendi üssü olarak bulunmamaktadır. Bu nedenle daha önce geometrik denklem için söylenen değerlerin aşırı büyüme veya küçülmesi söz konusu değildir. Tanımsız bölge de yoktur.

***Düzeltilmiş Hoerl modeli**

Daha önce adı geçen tüm düzeltilmiş modellerde olduğu gibi burada da üs olarak bulunan x serbest değişkeni yerine tersi olan $1/x$ yerleştirilmiştir. Bunun sonucu olarak ortaya çıkan yeni bağıntı şu şekilde olmaktadır:

$$y = ab^{1/x} x^c \quad (\text{A.16})$$

Bütün $1/x$ içeren ifadeler için geçerli olduğu gibi burada da x serbest değişkeninin sıfırdan farklı değerler alması gerekmektedir. Bu yönüyle bu metod bir asimptotik yaklaşıma uygundur.

Hoerl modellerinin her ikisinde de b sabitinin değerinin 1 olması halinde ortaya çıkan ifade bir kuvvet fonksiyonu olmaktadır.

Yoğunluk modelleri

*Ters

$$y = \frac{1}{ax + b} \quad (\text{A.17})$$

şeklinde bir genel yapı sergileyen bu metod aslında bilinen lineer bir denklemin tersinin alınmasından başka bir şey değildir. Ancak lineer bağıntıdan farklı olarak $ax+b$ değerinin herhangi bir yerde sıfıra eşit olması halinde tanımsız olmaktadır. Bu durum reel eksen takımı için geçerlidir.

*Ters ikinci dereceden

Ters fonksiyon bir lineer denklemin tersine çevrilmiş haliydi. Benzer şekilde bu metotta da ikinci dereceden bir denklem tersine çevrilmekte ve sonuçta şu şekilde bir ifade elde edilmektedir:

$$y = \frac{1}{a + bx + cx^2} \quad (\text{A.18})$$

Burada da paydada yer alan ifadenin (eğer varsa) kökleri olan x değerleri için tanımsız olma durumu söz konusudur. Denklem, c sabitinin sıfır olması halinde ters fonksiyon haline gelmektedir.

*Bleasdale

Bleasdale modelinde serbest değişken x bir tür lineer denklem halinde bulunmaktadır. Sadece fark, bu lineer denklemin bir üssü olmasıdır. Başka bir deyişle

$$y = (a + bx)^{-1/c} \quad (\text{A.19})$$

şeklinde olan bu denklem c sabitinin belli değerleri için lineer gibi davranabilmektedir. $c=-1$ için tam lineer iken $c=1$ için ters fonksiyon olmaktadır. c nin herhangi bir pozitif değerinin söz konusu olduğu halde ise $a+bx$ teriminin sıfır olması, reel alanda çözümün olmamasına neden olmaktadır.

*Harris

Harris modeli, Bleasdale tipinin biraz farklı bir uygulamasıdır. Yapı olarak aynı olmakla beraber, sadece x serbest değişkenini etkileyen ve diğer parametrelerin sabit kaldığı hallerde kullanılabilecek bir bağıntı cinsidir. Paydada yer alan terimlerin toplamının sıfıra eşit olması halinde yine reel eksenlerde çözüm bulunamaz.

$$y = \frac{1}{a + bx^c} \quad (\text{A.20})$$

Artım modelleri

*Doyma-artım modeli

Genel yapı olarak şimdiye kadar incelenen bütün denklem tiplerinden farklı olan artım modellerinde ifadenin birbirinden tamamen bağımsız iki yerinde serbest değişken farklı parametrelerle etkileşim halinde olmak üzere görünür. Bunların en basiti doyma artım modeli denen modeldir. Burada hem paydada ve hem de payda serbest değişken bulunmaktadır. Yapısal olarak asimptotik özellik gösteren ve ifadesi

$$y = \frac{ax}{b + x} \quad (\text{A.21})$$

şeklinde olan bu model, daha çok istatistik işlemlerinde kullanılmaktadır. Mühendislik uygulamalarına özel haller dışında yapı olarak pek uygun değildir.

*Üstel bağıntı 2

Üstel bağıntı modelleri, birbirinden ufak farklarla ayrılan iki temel tipe ayrılmaktadır. Özellikle 2. Üstel bağıntı olarak anılan tipteki model, daha sonra incelenecek olan Gauss modelinin biraz farklı bir cinsi olarak değerlendirilebilir. Aynı zamanda eksponansiyel modeller ile de benzerlik gösteren bu bağıntı tipine mühendislik uygulamalarında sık olarak rastlanmaktadır. Genel yapısı aşağıdaki gibidir:

$$y = a(1 - e^{-bx}) \quad (A.22)$$

*Üstel bağıntı 3

Yukarıda sözü edilen üstel bağıntı modelinin farklı bir uygulamasıdır. Aslında bu model, bir öncekinin genelleştirilmiş halidir. Genel ifadesi

$$y = a(b - e^{-cx}) \quad (A.23)$$

şeklindedir.

Sigmoidal modeller

*Gompertz

Gompertz bağıntısı, normal eksponansiyel bağıntıların yetersiz kaldığı ve son derece nadir rastlanan hallerde kullanılan bir modeldir.

$$y = ae^{-e^{-b-cx}} \quad (A.24)$$

gibi bir ifade ile verilen bu model, serbest değişkenin bağıntı içinden çekilmesi analitik olarak zor olduğundan ancak boyutsuz sayılar ile çalışırken ve veriler bu denklem tipine yeterli derecede uygun olduğu zaman kullanılabilir.

*Mantık modeli

Mantık devrelerinde kullanılan bu model önceki sigmoidal bağıntıları andırmaktadır. Özel haller dışında pek görülmeyen bu bağıntı çeşidinde paydanın yapısı dolayısıyla bir asimptotiklik görülür. Bağıntının genel ifadesi şu şekildedir:

$$y = \frac{a}{1 + be^{-cx}} \quad (\text{A.25})$$

*Richards

Gompertz bağıntısının özel bir hali olarak alınabilecek olan Richards modeli, mantık modeli gibi asimptotik değildir. Uygulama alanı pek geniş değildir.

$$y = \frac{a}{(1 + e^{b-cx})^{1/d}} \quad (\text{A.26})$$

*MMF

İçerdiği parametre sayısı en fazla olan modellerden biri MMF tir. Bu sayede özellikle önce yatay seyir izleyip daha sonra ani bir yükseliş gösteren ve ardından da tekrar yatay karaktere dönen basamağı andıran fonksiyonlar için kullanılmaktadır. Genel yapısı

$$y = \frac{ab + cx^d}{b + x^d} \quad (\text{A.27})$$

şeklindeydir. Ancak boyutsuz sayılarla çalışırken bile serbest değişkenin çekilmesi ve ayrı bir ifade haline getirilmesine pek olanak tanımadığından bu yönüyle mühendislik problemlerine her zaman uygulanamaz.

*Weibull

$$y = a - be^{-cx^d} \quad (\text{A.28})$$

tipinde bir ifadesi olan Weibull modelinde ilk göze çarpan özellik MMF modelinde olduğu gibi yüksek sayıda parametre içermesidir. Yapısı daha az

karışık olmakla beraber ancak özel uygulamalarda kullanım alanı bulabilen bu bağıntı cinsi MMF modelinden farklı olarak asimptotik değildir.

Çeşitli modeller

*Hiperbolik

Buraya kadar açıklanan modellerden farklı olarak, özellikle mühendislik uygulamalarında sıkça karşılaşılan ve çözümünde matematiksel fonksiyonlara başvuru yapılan modeller de mevcuttur. Bunlardan ilki olan hiperbolik model, fazlaca açıklama gerektirmeyen, bilinen hiperbol tanımlarını gösteren ve genel ifadesi

$$y = a + \frac{b}{x} \quad (\text{A.29})$$

şeklinde olan bağıntı temel alınarak oluşturulmuştur.

*Sinüsoidal

Özellikle elektrik, elektronik, nükleer fizik ve mekanik titreşimler başta olmak üzere makina mühendisliği problemlerinde zaman zaman karşılaşılan periyodik fonksiyon özelliği gösteren veriler değerlendirilirken

$$y = a + b \cos(cx + d) \quad (\text{A.30})$$

tipinde bir denklem kurmak gerekli olmaktadır. Sinüsoidal model diye de anılan bu tip denklemlerde serbest değişken başka bir matematiksel fonksiyon olan cos ifadesi içinde yer almaktadır. Bu nedenle, serbest değişkenin mutlaka boyutsuz bir sayı halinde işleme girmesi gerekmektedir.

Normal olarak bir cos fonksiyonu, argümanı her ne olursa olsun -1 ile +1 aralığı içinde sonuç verdiği için, biri çarpan ve diğeri de toplanan terim olmak üzere iki ayrı parametre ile uygun sonuçların eldesine çalışılır.

*Isıl kapasite

Fiziksel yorumlarda bulunmak amacıyla kullanılan bir başka denklem tipi de budur. Asimptotik yapıda olup önce büyük bir eğimle artan (veya azalan), ardından maksimum (veya minimum) noktasından geçtikten sonra

kararlı ve daha düşük bir eğimle azalan (veya artan) bir durum sergiler. Genel yapısı

$$y = a + bx + \frac{c}{x^2} \quad (\text{A.31})$$

şeklindedir.

*Gauss modeli

Gauss modeli, istatistik uygulamaları ile ilgilenenlerin belki de en sık karşılaştığı ifadelerdendir. Bir dağılım modelidir. Belirgin bir simetri eksenine sahiptir ve önce bir artım ve maksimum noktayı geçtikten sonra da azalış gösterir.

Genel karakteri aşağıdaki gibidir:

$$y = ae^{\frac{-(x-b)^2}{2c^2}} \quad (\text{A.32})$$

*Rasyonel fonksiyon

İki farklı dereceden polinomun birbirine bölünmesi olarak tanımlanabilecek olan rasyonel metod,

$$y = \frac{a + bx}{1 + cx + dx^2} \quad (\text{A.33})$$

şeklinde bir ifadeye sahiptir ve genel yaklaşım tarzlarındandır. Mühendislik alanında daha çok uygulama alanı bulan bu yöntemi belirleyen fonksiyon, paydada yer alan polinomun köklerinin olduğu noktalarda tanımsız olmaktadır.

Özel fonksiyonlar

Özel fonksiyonlar bölümünde yer alan tüm metodlar, daha önce anlatılmış olan normal yaklaşım yöntemlerinin yetersiz kaldığı çok özel mühendislik ve matematik uygulamalarında kullanılan ifadeleri içermektedirler. Genel olarak karmaşık sayılabilecek yapıda ve sayıca daha öncekilere göre fazla parametre taşıyan bu bağıntılar, ilk kez kullanan ve

teklif eden kişilerin adlarıyla veya yerine göre içerdiği fonksiyonların tipine göre değişen isimlerle anılmaktadırlar.

Burada tek tek bütün özel fonksiyonlar açıklanmak yerine kısaca genel yapıları verilecek ve gerekli hallerde küçük açıklamalar yapılmakla yetinilecektir.

*Bacon-Watts çift çizgi

$$y = a + b(x - d) - c(x - d) \tanh[(x - d) / e] \quad (\text{A.34})$$

*Bent hiperbol modeli

$$y = a + bx - \sqrt{(c + bx)^2 + d^2} \quad (\text{A.35})$$

*BET modeli

$$y = \frac{x}{a + bx - (a + b)x^2} \quad (\text{A.36})$$

*Beta dağılımı

Beta dağılımı, istatistik uygulamalarında karşılaşılan genel dağılım ifadelerinin matematiksel olarak gösterilmesinde kullanılmaktadır.

$$y = ax^b(1 - x)^c \quad (\text{A.37})$$

*Cauchy modeli

$$y = \frac{1}{a(x + b)^2 + c} \quad (\text{A.38})$$

*Chapman-Richards

$$y = a(1 - e^{-bx})^c \quad (\text{A.39})$$

*Freundlich modeli (genişletilmiş)

Freundlich modeli aslında bir eksponansiyel fonksiyondur. Ancak burada fazladan bir bağımsız değişken yer almaktadır. Geometrik model ile eksponansiyel model arasında bir geçit olarak kabul edilebilir.

$$y = ax^{bx^{-c}} \quad (\text{A.40})$$

*Gamma modeli

$$y = a\left(\frac{x}{b}\right)^c e^{a/b} \quad (\text{A.41})$$

*Genelleştirilmiş hiperbol modeli

$$y = a - \frac{b}{(1 + cx)^{1/d}} \quad (\text{A.42})$$

*Gunary

Gunary modeli yapı olarak bir rasyonel fonksiyon olmakla beraber paydada yer alan köklü ifade nedeniyle bir polinom oranından farklı yapıdadır. Reel eksenlerde sadece y ekseninin sağ tarafında bulunan değerleri alabilir.

$$y = \frac{x}{a + bx + c\sqrt{x}} \quad (\text{A.43})$$

*Ters model

Polinom metodunun bağımsız değişkenin ters alınmasıyla ortaya çıkan özel halidir. Isıl kapasite denklemi ile normal 2. dereceden bağıntının bir benzeridir.

$$y = a + \frac{b}{x} + \frac{c}{x^2} \quad (\text{A.44})$$

*Langmuir modeli (genişletilmiş)

$$y = \frac{1}{a + bx^{c-1}} \quad (\text{A.45})$$

*Doğal logaritma

Logaritma uygulamasının özel halidir. On tabanlı yerine e sayısını taban olarak alan doğal logaritmayı içerir.

$$y = ae^{(\ln x - b)^{2/c}} \quad (\text{A.46})$$

*Lorentz eşitliği

$$y = a + b(\cos(x - c))^d \quad (\text{A.47})$$

*Üslerin toplamı

Özel bir eksponansiyel fonksiyondur. İki farklı normal eksponansiyel fonksiyonun toplamı şeklinde ifade edilen bir bağıntıdır.

$$y = ae^{-bx} + ce^{-dx} \quad (\text{A.48})$$

*Kesilmiş Fourier serisi

Normal Fourier serisinden farkı üçüncü terimden sonrasının olmamasıdır. Gerçekte bu seri $\cos(nx+d)$ şeklinde bir terim içerir ve sonsuzdur. Ancak uygulamada aynen Taylor serisinin kullanıldığı hallerde baş vurulan yola benzer şekilde ilk üç terim alınıp geri kalanı çok küçük kabul edilerek atılması sonucunda kalanının hesaba girmesi ile probleme uygulanır.

$$y = a \cos(x + d) + b \cos(2x + d) + c \cos(3x + d) \quad (\text{A.49})$$

*İki parametrelili çan

$$y = \frac{a}{(1 + x^2)^b} \quad (\text{A.50})$$

Ek B - Seçilen yöntemin irdelemesi

Seçilen yöntem bir kuvvet fonksiyonudur. Bir parametre ile bağımsız değişkenin bir başka parametreyi üs olarak aldığı halde çarpılması ile elde edilir.

$$y = ax^b \quad (B.1)$$

genel ifadesine sahiptir. Normal şartlarda sürekli artan bir fonksiyondur ve matematiksel açıdan değerlendirilecek olursa herhangi bir süreksizlik noktası içermemektedir.

Elbette ki probleme dahil olan parametrelerin sayısının birden fazla olması, bağıntının genel karakterini değiştirmemekle beraber terim sayısını artırıcı yönde etki etmektedir. Bunu açıklamak gerekirse,

$$y = ax_1^b x_2^c x_3^d \dots \quad (B.2)$$

şeklinde bir fonksiyon elde edilmektedir.

Burada a, b, c, d ve diğerleri her grup için geçerli olan sabitler iken x serbest değişkenleri de probleme doğrudan doğruya etki eden fiziksel ve termodinamik parametreleri göstermektedir.

Başka bir deyişle, seçilen yöntem uygulandığında ortaya çıkan sonuç, problemin kendine özgü değişkenleri cinsinden yazılırsa şöyle olmaktadır:

$$h = aq^b G^c x^d \quad (B.3)$$

Genel karakteri bozmamak şartı ile denkleme giren boyutlu değişkenler çeşitli işlemlerden geçirilerek boyutsuz hale getirilmiştir.

Ek C - Veriler

Tablo 1. 10 C sabit buharlaşma sıcaklığında ve 6 mm çaplı boru kullanılarak yapılan deneylerin sonuçları

x (-)	G kg/h	q kcal/m ² h	h kcal/m ² hC	tw C	akış tipi (-)	qd/kt (-)	Nu (-)
0,1	7,8	4000	967,0	14,14	b	28,57	69,07
0,1	7,8	8000	1194,0	16,70	b	57,14	85,29
0,1	7,8	12000	1530,0	17,84	b	85,71	109,29
0,1	7,8	18000	1965,0	19,16	b,d	128,57	140,36
0,1	7,8	25000	2320,0	20,78	d,f	178,57	165,71
0,1	10,8	4000	1430,0	12,80	b,d	28,57	102,14
0,1	10,8	8000	1470,0	15,44	b,d	57,14	105,00
0,1	10,8	12000	1800,0	16,67	b,d	85,71	128,57
0,1	10,8	18000	2280,0	17,89	b,d	128,57	162,86
0,1	10,8	25000	2295,0	20,89	d,f	178,57	163,93
0,1	10,8	37400	2780,0	23,45	d,f	267,14	198,57
0,1	10,8	45000	2960,0	25,20	d,f	321,43	211,43
0,1	16,6	4000	1785,0	12,24	d,b	28,57	127,50
0,1	16,6	8000	1700,0	14,71	d,b	57,14	121,43
0,1	16,6	12000	2120,0	15,66	d,b	85,71	151,43
0,1	16,6	18000	2380,0	17,56	d,b	128,57	170,00
0,1	16,6	25000	2325,0	20,75	d,f	178,57	166,07
0,1	16,6	37400	2585,0	24,47	d,f	267,14	184,64
0,1	16,6	50000	3060,0	26,34	f	357,14	218,57
0,1	16,6	60000	3190,0	28,81	f	428,57	227,86
0,1	20,7	4000	2185,0	11,83	d,b	28,57	156,07
0,1	20,7	8000	1860,0	14,30	d,b	57,14	132,86
0,1	20,7	12000	2080,0	15,77	d,b	85,71	148,57
0,1	20,7	18000	2430,0	17,41	d,b	128,57	173,57
0,1	20,7	25000	2660,0	19,40	d,f	178,57	190,00
0,1	20,7	37400	2950,0	22,68	d,f	267,14	210,71
0,1	20,7	50000	3350,0	24,93	f	357,14	239,29
0,1	20,7	60000	3700,0	26,22	f	428,57	264,29
0,1	20,7	70000	4040,0	27,33	f	500,00	288,57
0,1	20,7	80000	4570,0	27,51	f	571,43	326,43
0,1	25,6	8000	2310,0	13,46	d,f	57,14	165,00
0,1	25,6	12000	2510,0	14,78	d,f	85,71	179,29
0,1	25,6	18000	2590,0	16,95	d,f	128,57	185,00
0,1	25,6	25000	2730,0	19,16	d,f	178,57	195,00
0,1	25,6	50000	3820,0	23,09	f	357,14	272,86
0,1	25,6	60000	4260,0	24,08	f	428,57	304,29
0,1	25,6	80000	3390,0	33,60	f	571,43	242,14

Tablo 1. (devam)

0,3	5,0	6000	1020,0	15,88	b	42,86	72,86
0,3	5,0	8000	1118,0	17,16	b,d	57,14	79,86
0,3	5,0	12000	1370,0	18,76	b,d	85,71	97,86
0,3	5,0	18000	1865,0	19,65	b,d	128,57	133,21
0,3	7,3	4000	2290,0	11,75	d,f	28,57	163,57
0,3	7,3	8000	1685,0	14,75	d,f	57,14	120,36
0,3	7,3	12000	1820,0	16,59	d,f	85,71	130,00
0,3	7,3	18000	2070,0	18,70	d,f	128,57	147,86
0,3	7,3	25000	2640,0	19,47	d,f	178,57	188,57
0,3	11,5	8000	2660,0	13,01	d,f	57,14	190,00
0,3	11,5	12000	2715,0	14,42	d,f	85,71	193,93
0,3	11,5	18000	3710,0	14,85	d,f	128,57	265,00
0,3	11,5	25000	3088,0	18,10	d,f	178,57	220,57
0,3	11,5	40000	3374,0	21,86	d,f	285,71	241,00
0,3	15,2	8000	2160,0	13,70	d,f	57,14	154,29
0,3	15,2	12000	2980,0	14,03	d,f	85,71	212,86
0,3	15,2	18000	3100,0	15,81	d,f	128,57	221,43
0,3	15,2	25000	3000,0	18,33	d,f	178,57	214,29
0,3	15,2	37400	3830,0	19,77	d,f	267,14	273,57
0,3	15,2	50000	4480,0	21,16	d,f	357,14	320,00
0,4	6,0	4000	1540,0	12,60	b,d	28,57	110,00
0,4	6,0	8000	1320,0	16,06	b,d	57,14	94,29
0,4	6,0	12000	1500,0	18,00	b,d	85,71	107,14
0,4	6,0	18000	1855,0	19,70	b,d	128,57	132,50
0,4	6,0	25000	2290,0	20,92	b,d	178,57	163,57
0,4	9,0	8000	2720,0	12,94	d,f	57,14	194,29
0,4	9,0	12000	2475,0	14,85	d,f	85,71	176,79
0,4	9,0	18000	2600,0	16,92	d,f	128,57	185,71
0,4	9,0	25000	2700,0	19,26	d,f	178,57	192,86
0,4	9,0	40000	3390,0	21,80	d,f	285,71	242,14
0,4	14,2	4000	4000,0	11,00	d,f	28,57	285,71
0,4	14,2	8000	3390,0	12,36	d,f	57,14	242,14
0,4	14,2	12000	3280,0	13,66	d,f	85,71	234,29
0,4	14,2	18000	3160,0	15,70	d,f	128,57	225,71
0,4	14,2	30000	3240,0	19,26	f	214,29	231,43
0,4	14,2	60000	4815,0	22,46	f	428,57	343,93
0,4	22,0	12000	4780,0	12,51	f	85,71	341,43
0,4	22,0	18000	4790,0	13,76	f	128,57	342,14
0,4	22,0	35000	3180,0	21,01	f	250,00	227,14
0,4	22,0	60000	3030,0	29,80	f	428,57	216,43
0,4	22,0	70000	3170,0	32,08	f	500,00	226,43
0,4	22,0	80000	3470,0	33,05	f	571,43	247,86
0,4	22,0	90000	3510,0	35,64	f	642,86	250,71

Tablo 1. (devam)

0,5	4,2	2000	782,0	12,56	b	14,29	55,86
0,5	4,2	4000	685,0	15,84	b	28,57	48,93
0,5	4,2	8000	947,0	18,45	b	57,14	67,64
0,5	4,2	12000	1240,0	19,68	b	85,71	88,57
0,5	4,2	18000	1585,0	21,36	b	128,57	113,21
0,5	4,2	22000	1870,0	21,76	b	157,14	133,57
0,5	5,6	4000	1285,0	13,11	b	28,57	91,79
0,5	5,6	8000	1235,0	16,48	b	57,14	88,21
0,5	5,6	12000	1485,0	18,08	b	85,71	106,07
0,5	5,6	18000	1780,0	20,11	b	128,57	127,14
0,5	5,6	25000	2270,0	21,01	b,d	178,57	162,14
0,5	8,0	8000	2375,0	13,37	d,f	57,14	169,64
0,5	8,0	12000	2182,0	15,50	d,f	85,71	155,86
0,5	8,0	18000	2320,0	17,76	d,f	128,57	165,71
0,5	8,0	25000	2500,0	20,00	d,f	178,57	178,57
0,5	8,0	40000	3200,0	22,50	d,f	285,71	228,57
0,5	10,2	8000	3400,0	12,35	d,f	57,14	242,86
0,5	10,2	12000	3000,0	14,00	d,f	85,71	214,29
0,5	10,2	18000	2880,0	16,25	d,f	128,57	205,71
0,5	10,2	25000	2615,0	19,56	d,f	178,57	186,79
0,5	10,2	37400	3440,0	20,87	d,f	267,14	245,71
0,5	10,2	50000	4080,0	22,25	d,f	357,14	291,43
0,5	10,2	60000	4050,0	24,81	d,f	428,57	289,29
0,5	11,3	4000	3200,0	11,25	d,f	28,57	228,57
0,5	11,3	6000	3240,0	11,85	d,f	42,86	231,43
0,5	11,3	10000	3030,0	13,30	d,f	71,43	216,43
0,5	11,3	15000	3490,0	14,30	d,f	107,14	249,29
0,5	13,6	8000	4570,0	11,75	d,f	57,14	326,43
0,5	13,6	12000	4140,0	12,90	d,f	85,71	295,71
0,5	13,6	18000	4230,0	14,26	d,f	128,57	302,14
0,5	13,6	50000	4240,0	21,79	d,f	357,14	302,86
0,5	13,6	60000	4760,0	22,61	d,f	428,57	340,00
0,7	6,0	8000	1485,0	15,39	b,d	57,14	106,07
0,7	6,0	12000	1510,0	17,95	b,d	85,71	107,86
0,7	6,0	18000	1745,0	20,32	b,d	128,57	124,64
0,7	8,0	8000	2840,0	12,82	b,d	57,14	202,86
0,7	8,0	12000	2690,0	14,46	b,d	85,71	192,14
0,7	8,0	18000	2670,0	16,74	b,d	128,57	190,71
0,7	8,1	8000	2300,0	13,48	b,d	57,14	164,29
0,7	8,1	12000	2885,0	14,16	d,f	85,71	206,07
0,7	8,1	18000	2870,0	16,27	d,f	128,57	205,00
0,7	10,9	8000	3400,0	12,35	d,f	57,14	242,86
0,7	10,9	12000	3120,0	13,85	d,f	85,71	222,86
0,7	10,9	18000	3200,0	15,63	d,f	128,57	228,57

Tablo 1. (devam)

0,8	4,1	4000	902,0	14,43	b	28,57	64,43
0,8	4,1	8000	930,0	18,60	b	57,14	66,43
0,8	4,1	12000	1180,0	20,17	b	85,71	84,29
0,8	4,1	18000	1560,0	21,54	b	128,57	111,43
0,8	5,9	4000	1770,0	12,26	b	28,57	126,43
0,8	5,9	8000	1346,0	15,94	b	57,14	96,14
0,8	5,9	12000	1420,0	18,45	b	85,71	101,43
0,8	5,9	18000	1714,0	20,50	b	128,57	122,43
0,8	8,0	4000	4760,0	10,84	d	28,57	340,00
0,8	8,0	8000	3520,0	12,27	d	57,14	251,43
0,8	8,0	12000	2940,0	14,08	d	85,71	210,00
0,8	8,7	10000	3700,0	12,70	d,f	71,43	264,29
0,8	8,7	12000	3380,0	13,55	d,f	85,71	241,43
0,8	9,3	8000	4790,0	11,67	d,f	57,14	342,14
0,8	9,3	12000	4000,0	13,00	d,f	85,71	285,71
0,8	9,3	18000	3623,0	14,97	d,f	128,57	258,79
0,8	12,3	10000	6400,0	11,56	d,f	71,43	457,14
0,8	12,3	12000	5460,0	12,20	d,f	85,71	390,00

Ek D - Sonuçlar

Tablo 2. Tablo 1 verileri kullanılarak bulunan ifade ile gerçek deney sonuçlarının karşılaştırması

x (-)	G/Go (-)	qd/kt (-)	Nud (-)	Nuh (-)	fark (-)	sapma (%)	kabul (-)
0,1	,305	28,57	967,0	1119,7	152,7	13,64	+
0,1	,305	57,14	1194,0	1296,9	102,9	7,93	+
0,1	,305	85,71	1530,0	1413,3	-116,7	-8,26	+
0,1	,305	128,57	1965,0	1540,2	-424,8	-27,58	+
0,1	,305	178,57	2320,0	1651,3	-668,7	-40,50	-
0,1	,422	28,57	1430,0	1383,0	-47,0	-3,40	+
0,1	,422	57,14	1470,0	1601,9	131,9	8,23	+
0,1	,422	85,71	1800,0	1745,7	-54,3	-3,11	+
0,1	,422	128,57	2280,0	1902,4	-377,6	-19,85	+
0,1	,422	178,57	2295,0	2039,6	-255,4	-12,52	+
0,1	,422	267,14	2780,0	2221,4	-558,6	-25,15	+
0,1	,422	321,43	2960,0	2310,2	-649,8	-28,12	+
0,1	,648	28,57	1785,0	1828,0	43,0	2,35	+
0,1	,648	57,14	1700,0	2117,3	417,3	19,71	+
0,1	,648	85,71	2120,0	2307,4	187,4	8,12	+
0,1	,648	128,57	2380,0	2514,5	134,5	5,35	+
0,1	,648	178,57	2325,0	2695,9	370,9	13,76	+
0,1	,648	267,14	2585,0	2936,2	351,2	11,96	+
0,1	,648	357,14	3060,0	3122,6	62,6	2,00	+
0,1	,648	428,57	3190,0	3245,7	55,7	1,71	+
0,1	,809	28,57	2185,0	2109,5	-75,5	-3,58	+
0,1	,809	57,14	1860,0	2443,5	583,5	23,88	+
0,1	,809	85,71	2080,0	2662,8	582,8	21,89	+
0,1	,809	128,57	2430,0	2901,8	471,8	16,26	+
0,1	,809	178,57	2660,0	3111,1	451,1	14,50	+
0,1	,809	267,14	2950,0	3388,4	438,4	12,94	+
0,1	,809	357,14	3350,0	3603,6	253,6	7,04	+
0,1	,809	428,57	3700,0	3745,6	45,6	1,22	+
0,1	,809	500,00	4040,0	3870,0	-170,0	-4,39	+
0,1	,809	571,43	4570,0	3981,1	-588,9	-14,79	+
0,1	1,000	57,14	2310,0	2804,7	494,7	17,64	+
0,1	1,000	85,71	2510,0	3056,5	546,5	17,88	+
0,1	1,000	128,57	2590,0	3330,8	740,8	22,24	+
0,1	1,000	178,57	2730,0	3571,1	841,1	23,55	+
0,1	1,000	357,14	3820,0	4136,3	316,3	7,65	+
0,1	1,000	428,57	4260,0	4299,3	39,3	0,91	+
0,1	1,000	571,43	3390,0	4569,7	1179,7	25,82	+

Tablo 2. (devam)

0,3	,195	42,86	1020,0	1253,2	233,2	18,61	+
0,3	,195	57,14	1118,0	1332,0	214,0	16,07	+
0,3	,195	85,71	1370,0	1451,6	81,6	5,62	+
0,3	,195	128,57	1865,0	1581,9	-283,1	-17,90	+
0,3	,285	28,57	2290,0	1470,1	-819,9	-55,77	-
0,3	,285	57,14	1685,0	1702,8	17,8	1,05	+
0,3	,285	85,71	1820,0	1855,7	35,7	1,92	+
0,3	,285	128,57	2070,0	2022,2	-47,8	-2,36	+
0,3	,285	178,57	2640,0	2168,1	-471,9	-21,77	+
0,3	,449	57,14	2660,0	2287,0	-373,0	-16,31	+
0,3	,449	85,71	2715,0	2492,3	-222,7	-8,94	+
0,3	,449	128,57	3710,0	2716,0	-994,0	-36,60	-
0,3	,449	178,57	3088,0	2911,9	-176,1	-6,05	+
0,3	,449	285,71	3374,0	3217,0	-157,0	-4,88	+
0,3	,594	57,14	2160,0	2740,9	580,9	21,19	+
0,3	,594	85,71	2980,0	2986,9	6,9	0,23	+
0,3	,594	128,57	3100,0	3255,0	155,0	4,76	+
0,3	,594	178,57	3000,0	3489,8	489,8	14,03	+
0,3	,594	267,14	3830,0	3800,9	-29,1	-0,77	+
0,3	,594	357,14	4480,0	4042,2	-437,8	-10,83	+
0,4	,234	28,57	1540,0	1405,8	-134,2	-9,54	+
0,4	,234	57,14	1320,0	1628,4	308,4	18,94	+
0,4	,234	85,71	1500,0	1774,5	274,5	15,47	+
0,4	,234	128,57	1855,0	1933,8	78,8	4,08	+
0,4	,234	178,57	2290,0	2073,3	-216,7	-10,45	+
0,4	,352	57,14	2720,0	2118,5	-601,5	-28,39	+
0,4	,352	85,71	2475,0	2308,7	-166,3	-7,20	+
0,4	,352	128,57	2600,0	2515,9	-84,1	-3,34	+
0,4	,352	178,57	2700,0	2697,4	-2,6	-0,10	+
0,4	,352	285,71	3390,0	2980,0	-410,0	-13,76	+
0,4	,555	28,57	4000,0	2458,9	-1541,1	-62,67	-
0,4	,555	57,14	3390,0	2848,2	-541,8	-19,02	+
0,4	,555	85,71	3280,0	3103,8	-176,2	-5,68	+
0,4	,555	128,57	3160,0	3382,4	222,4	6,58	+
0,4	,555	214,29	3240,0	3769,3	529,3	14,04	+
0,4	,555	428,57	4815,0	4366,0	-449,0	-10,29	+
0,4	,859	85,71	4780,0	4123,8	-656,2	-15,91	+
0,4	,859	128,57	4790,0	4493,9	-296,1	-6,59	+
0,4	,859	250,00	3180,0	5174,3	1994,3	38,54	-
0,4	,859	428,57	3030,0	5800,7	2770,7	47,76	-
0,4	,859	500,00	3170,0	5993,3	2823,3	47,11	-
0,4	,859	571,43	3470,0	6165,4	2695,4	43,72	-
0,4	,859	642,86	3510,0	6321,3	2811,3	44,47	-

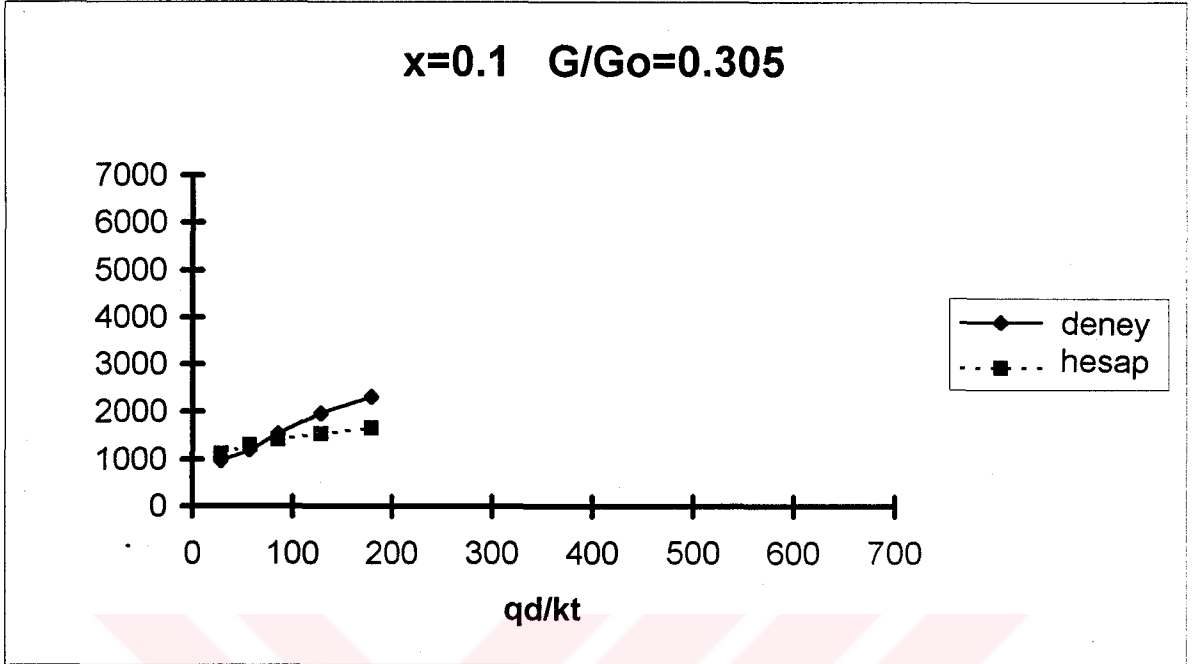
Tablo 2. (devam)

0,5	,164	14,29	782,0	1026,6	244,6	23,83	+
0,5	,164	28,57	685,0	1189,1	504,1	42,39	-
0,5	,164	57,14	947,0	1377,3	430,3	31,24	-
0,5	,164	85,71	1240,0	1500,9	260,9	17,39	+
0,5	,164	128,57	1585,0	1635,7	50,7	3,10	+
0,5	,164	157,14	1870,0	1706,8	-163,2	-9,56	+
0,5	,219	28,57	1285,0	1433,2	148,2	10,34	+
0,5	,219	57,14	1235,0	1660,0	425,0	25,60	+
0,5	,219	85,71	1485,0	1809,0	324,0	17,91	+
0,5	,219	128,57	1780,0	1971,4	191,4	9,71	+
0,5	,219	178,57	2270,0	2113,6	-156,4	-7,40	+
0,5	,313	57,14	2375,0	2092,4	-282,6	-13,50	+
0,5	,313	85,71	2182,0	2280,2	98,2	4,31	+
0,5	,313	128,57	2320,0	2484,9	164,9	6,64	+
0,5	,313	178,57	2500,0	2664,1	164,1	6,16	+
0,5	,313	285,71	3200,0	2943,3	-256,7	-8,72	+
0,5	,398	57,14	3400,0	2449,8	-950,2	-38,79	-
0,5	,398	85,71	3000,0	2669,7	-330,3	-12,37	+
0,5	,398	128,57	2880,0	2909,3	29,3	1,01	+
0,5	,398	178,57	2615,0	3119,1	504,1	16,16	+
0,5	,398	267,14	3440,0	3397,2	-42,8	-1,26	+
0,5	,398	357,14	4080,0	3612,9	-467,1	-12,93	+
0,5	,398	428,57	4050,0	3755,3	-294,7	-7,85	+
0,5	,441	28,57	3200,0	2260,3	-939,7	-41,57	-
0,5	,441	42,86	3240,0	2463,2	-776,8	-31,53	-
0,5	,441	71,43	3030,0	2745,0	-285,0	-10,38	+
0,5	,441	107,14	3490,0	2991,4	-498,6	-16,67	+
0,5	,531	57,14	4570,0	2952,6	-1617,4	-54,78	-
0,5	,531	85,71	4140,0	3217,7	-922,3	-28,66	+
0,5	,531	128,57	4230,0	3506,5	-723,5	-20,63	+
0,5	,531	357,14	4240,0	4354,5	114,5	2,63	+
0,5	,531	428,57	4760,0	4526,1	-233,9	-5,17	+
0,7	,234	57,14	1485,0	1912,1	427,1	22,34	+
0,7	,234	85,71	1510,0	2083,7	573,7	27,53	+
0,7	,234	128,57	1745,0	2270,7	525,7	23,15	+
0,7	,313	57,14	2840,0	2304,6	-535,4	-23,23	+
0,7	,313	85,71	2690,0	2511,4	-178,6	-7,11	+
0,7	,313	128,57	2670,0	2736,9	66,9	2,44	+
0,7	,316	57,14	2300,0	2319,5	19,5	0,84	+
0,7	,316	85,71	2885,0	2527,7	-357,3	-14,14	+
0,7	,316	128,57	2870,0	2754,6	-115,4	-4,19	+
0,7	,426	57,14	3400,0	2816,9	-583,1	-20,70	+
0,7	,426	85,71	3120,0	3069,8	-50,2	-1,64	+
0,7	,426	128,57	3200,0	3345,3	145,3	4,34	+

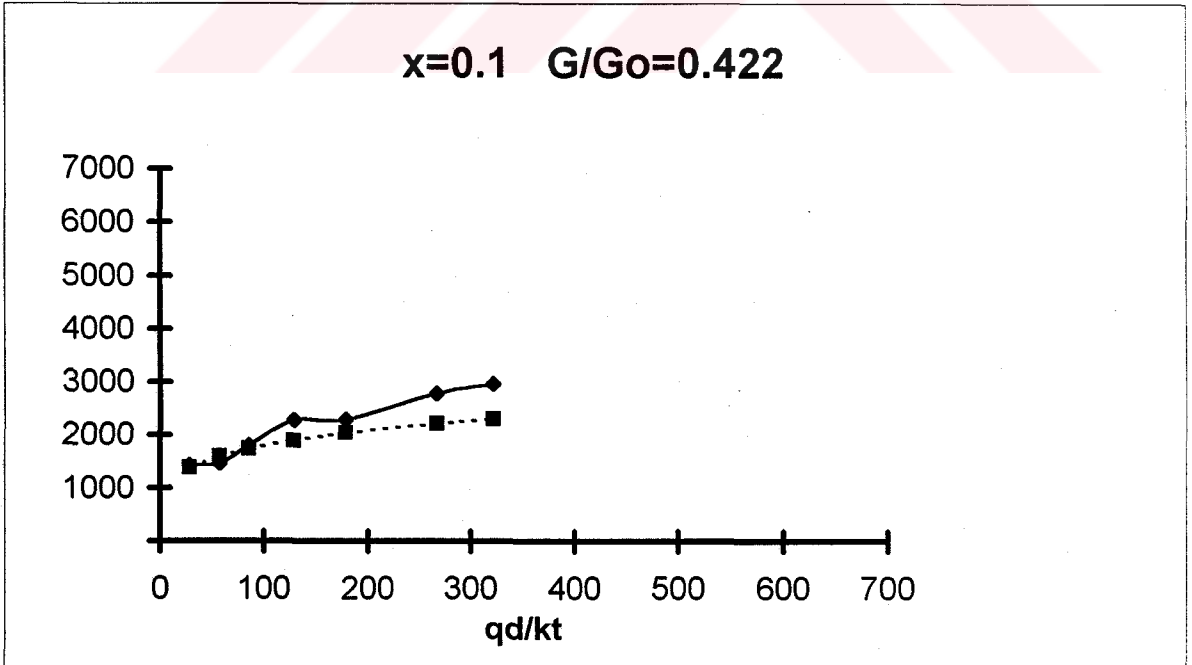
Tablo 2. (devam)

0,8	,159	28,57	902,0	1333,3	431,3	32,35	-
0,8	,159	57,14	930,0	1544,4	614,4	39,78	-
0,8	,159	85,71	1180,0	1683,0	503,0	29,89	+
0,8	,159	128,57	1560,0	1834,1	274,1	14,94	+
0,8	,230	28,57	1770,0	1696,6	-73,4	-4,32	+
0,8	,230	57,14	1346,0	1965,2	619,2	31,51	-
0,8	,230	85,71	1420,0	2141,6	721,6	33,69	-
0,8	,230	128,57	1714,0	2333,8	619,8	26,56	+
0,8	,313	28,57	4760,0	2067,4	-2692,6	-130,25	-
0,8	,313	57,14	3520,0	2394,6	-1125,4	-47,00	-
0,8	,313	85,71	2940,0	2609,5	-330,5	-12,66	+
0,8	,340	71,43	3700,0	2651,1	-1048,9	-39,57	-
0,8	,340	85,71	3380,0	2755,5	-624,5	-22,66	+
0,8	,363	57,14	4790,0	2640,4	-2149,6	-81,41	-
0,8	,363	85,71	4000,0	2877,4	-1122,6	-39,01	-
0,8	,363	128,57	3623,0	3135,7	-487,3	-15,54	+
0,8	,480	71,43	6400,0	3319,1	-3080,9	-92,82	-
0,8	,480	85,71	5460,0	3449,9	-2010,1	-58,27	-

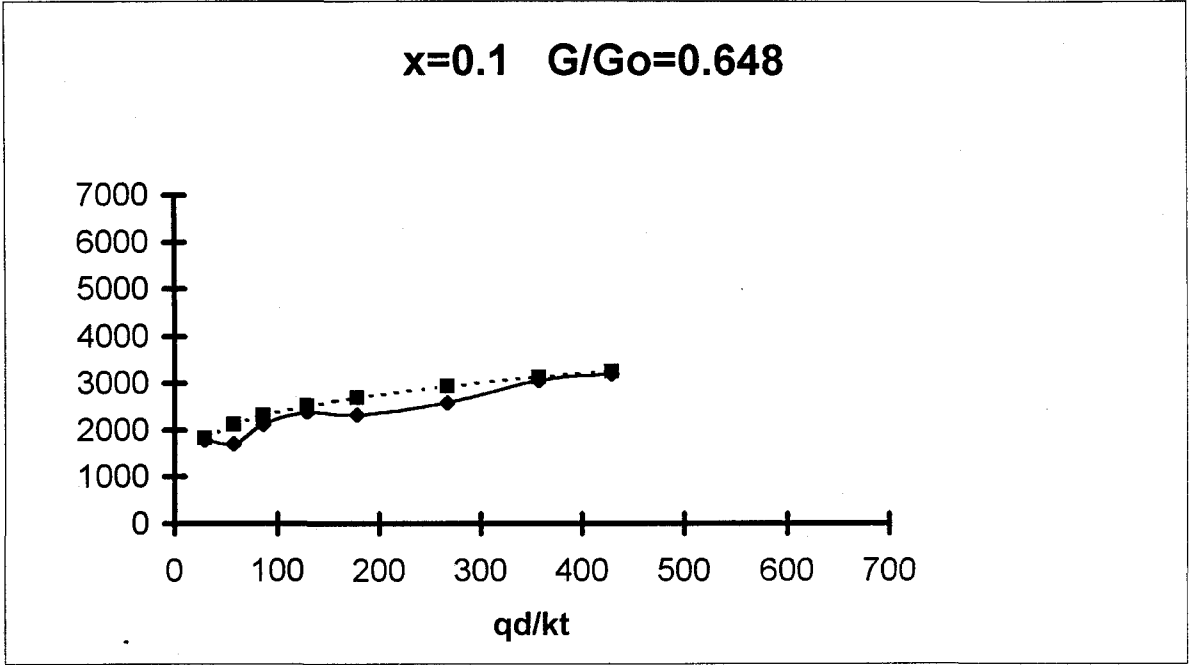
Ek E - Grafikler



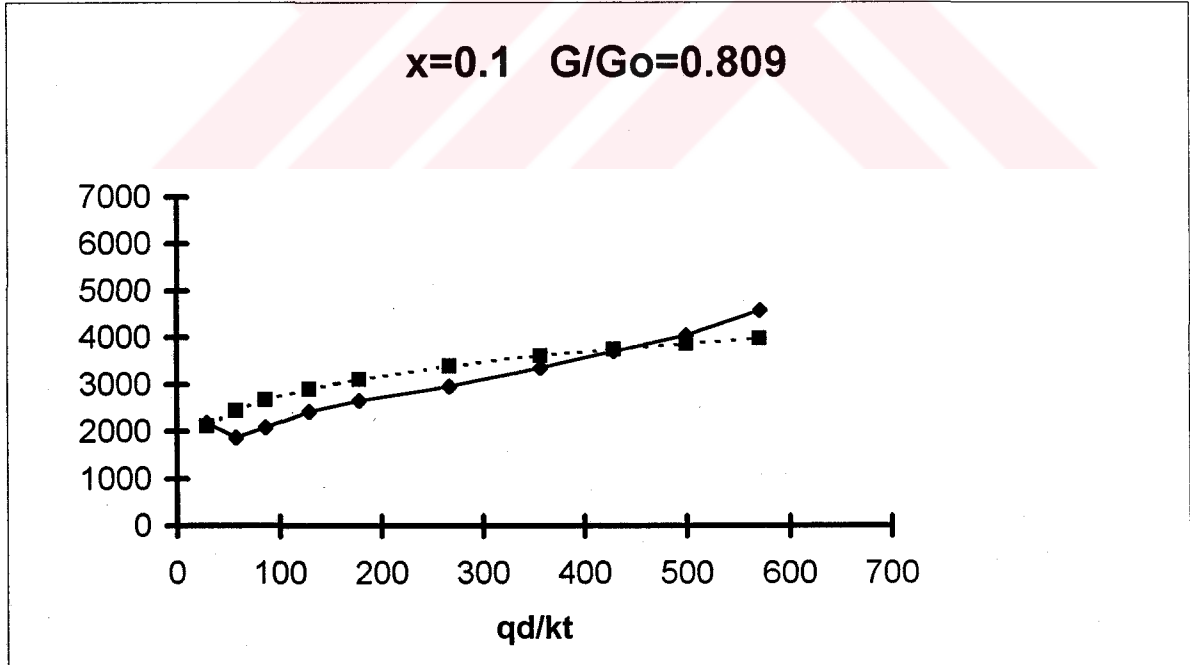
Şekil Ek E.1.1. $x=0.1$ ve $G/Go=0.305$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



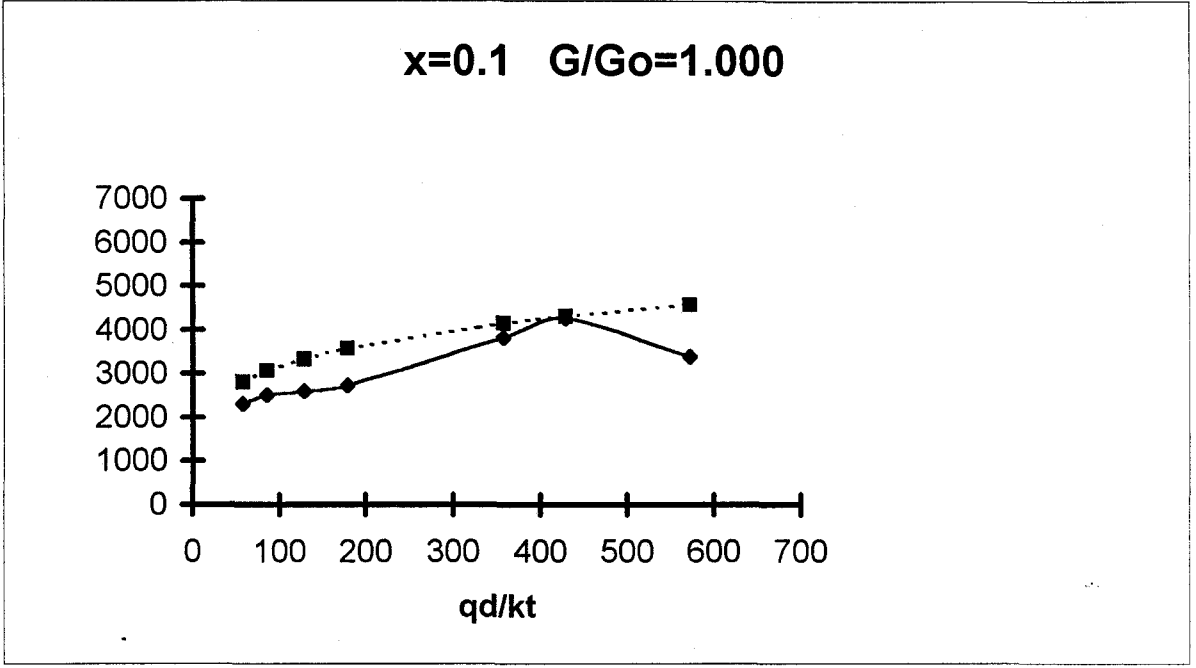
Şekil Ek E.1.2. $x=0.1$ ve $G/Go=0.422$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



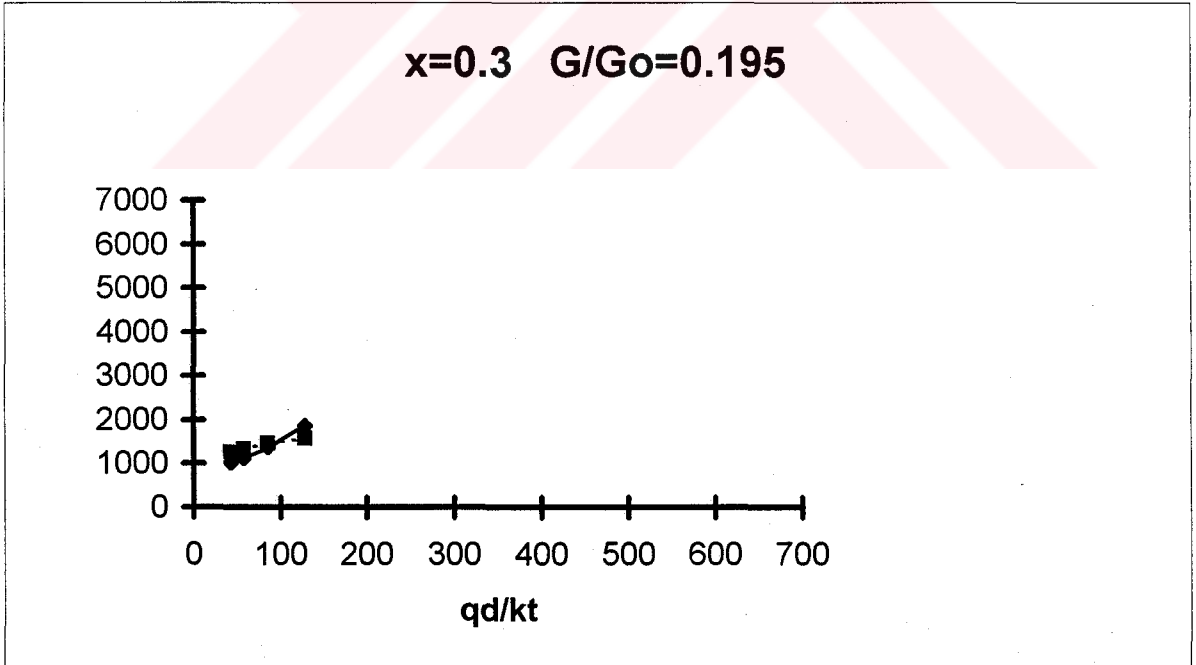
Şekil Ek E.1.3. $x=0.1$ ve $G/G_0=0.648$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



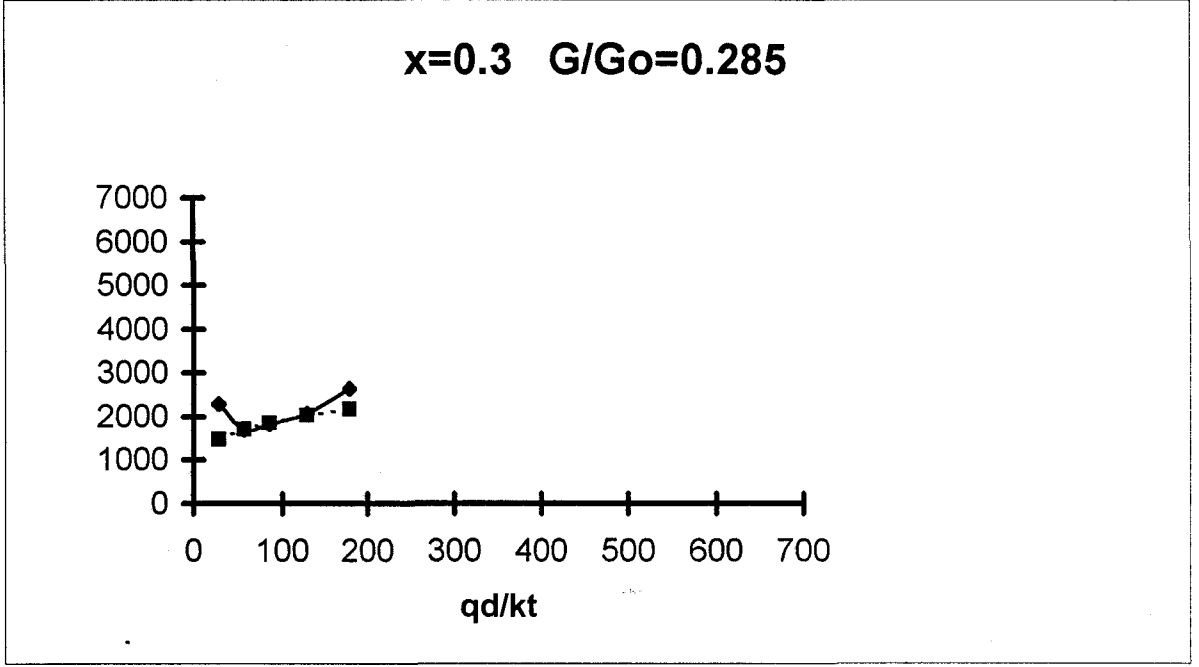
Şekil Ek E.1.4. $x=0.1$ ve $G/G_0=0.809$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



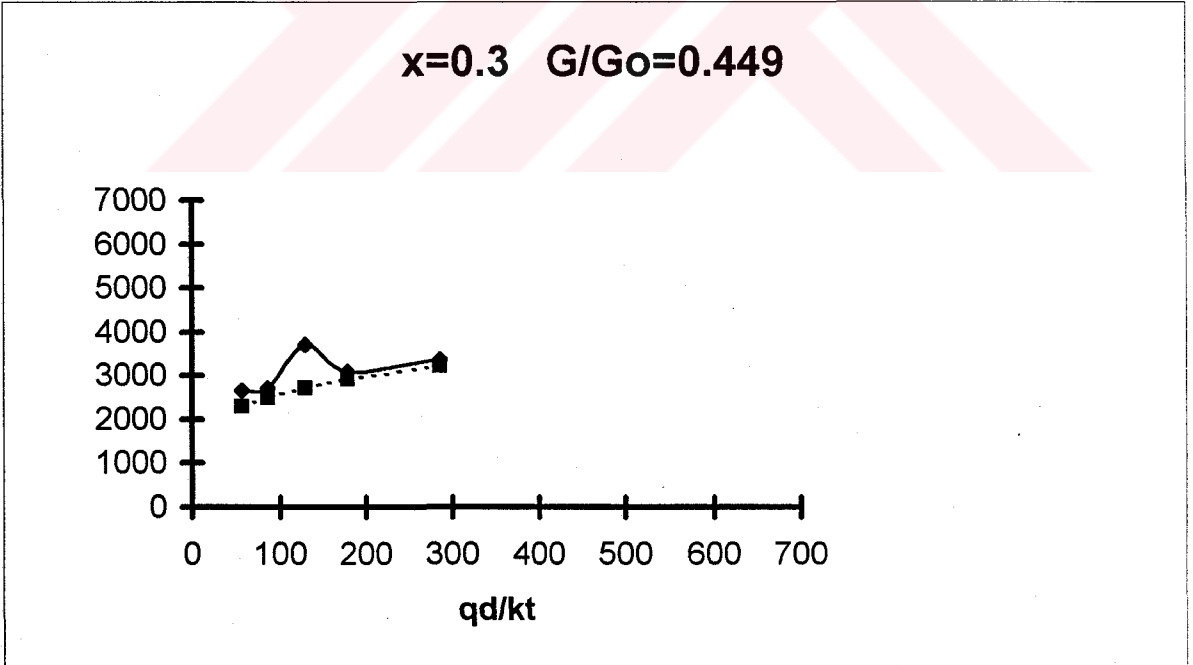
Şekil Ek E.1.5. $x=0.1$ ve $G/G_0=1.000$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



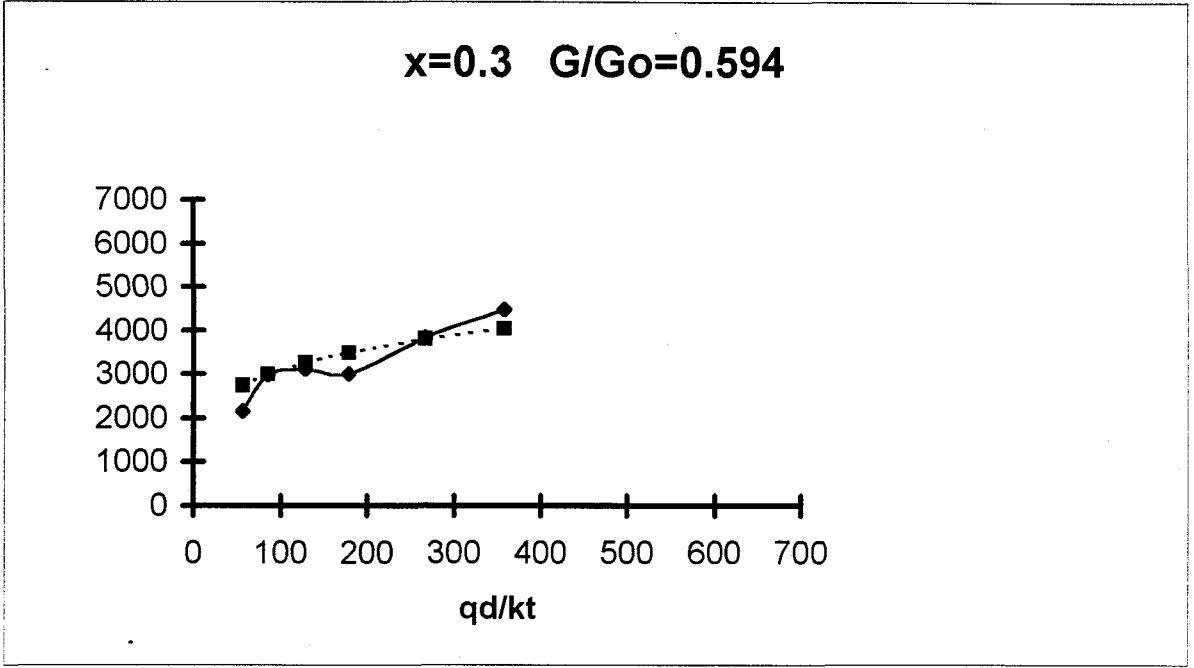
Şekil Ek E.2.1. $x=0.3$ ve $G/G_0=0.195$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



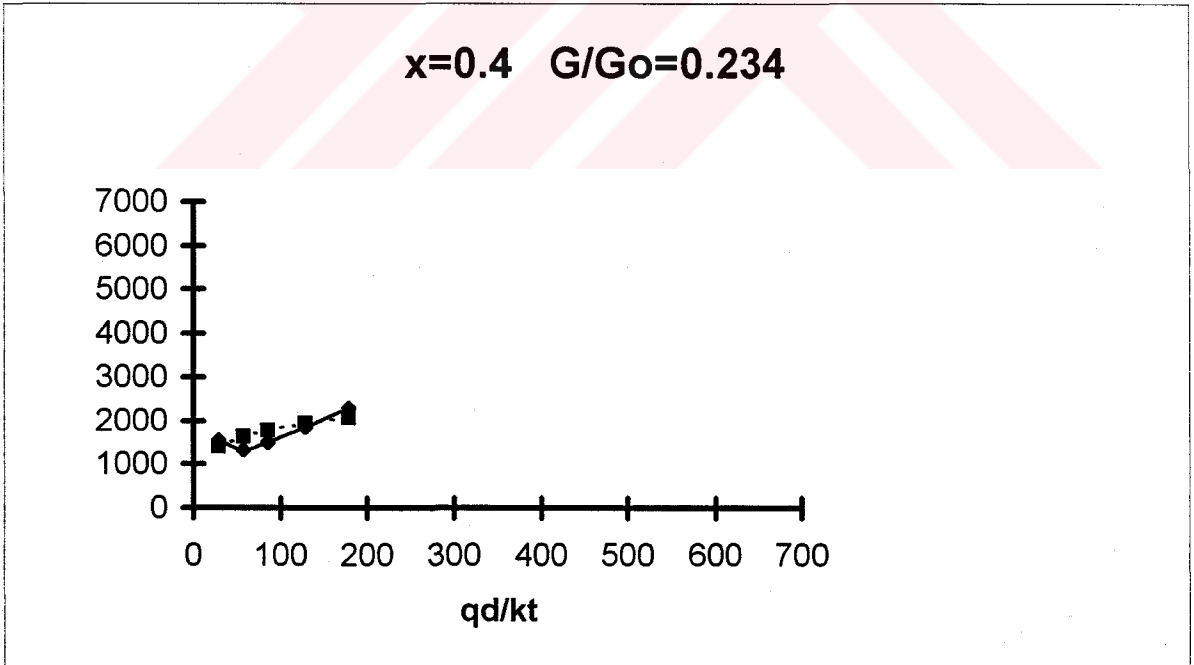
Şekil Ek E.2.2. $x=0.3$ ve $G/Go=0.285$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



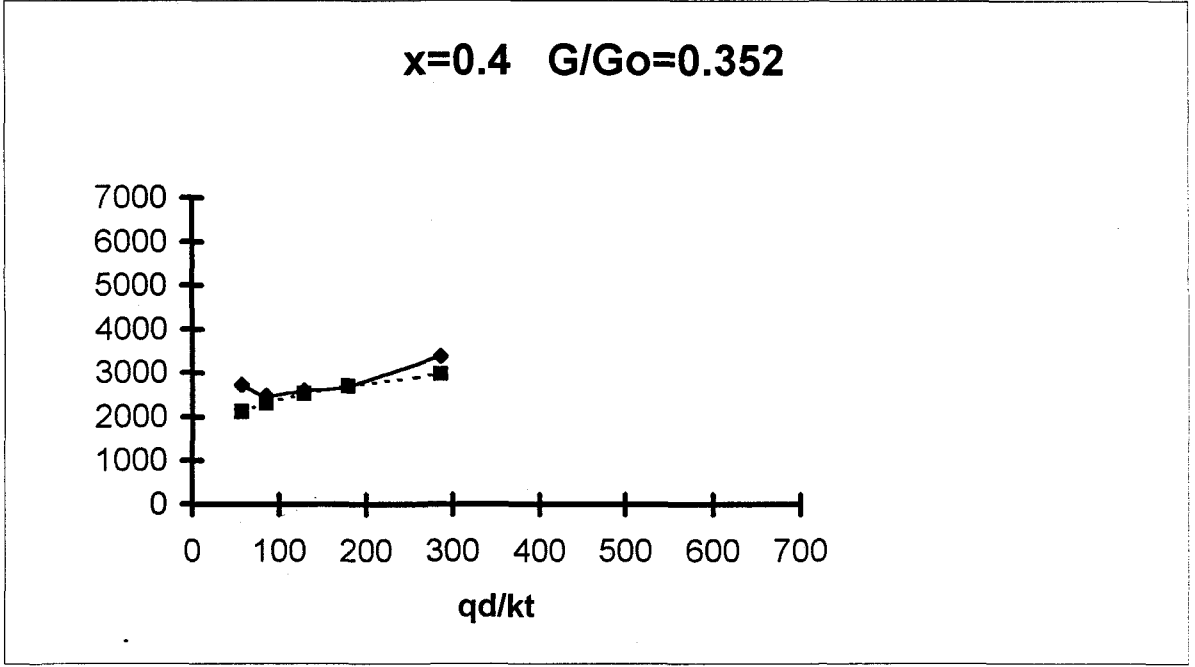
Şekil Ek E.2.3. $x=0.3$ ve $G/Go=0.449$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



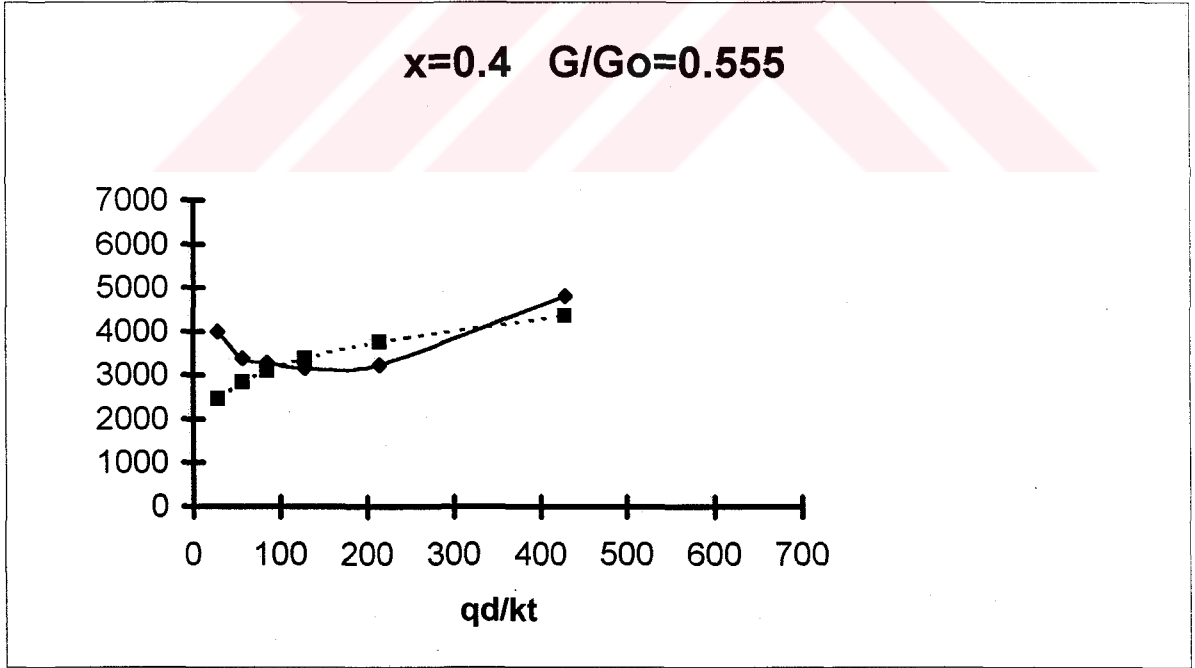
Şekil Ek E.2.4. $x=0.3$ ve $G/G_0=0.594$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



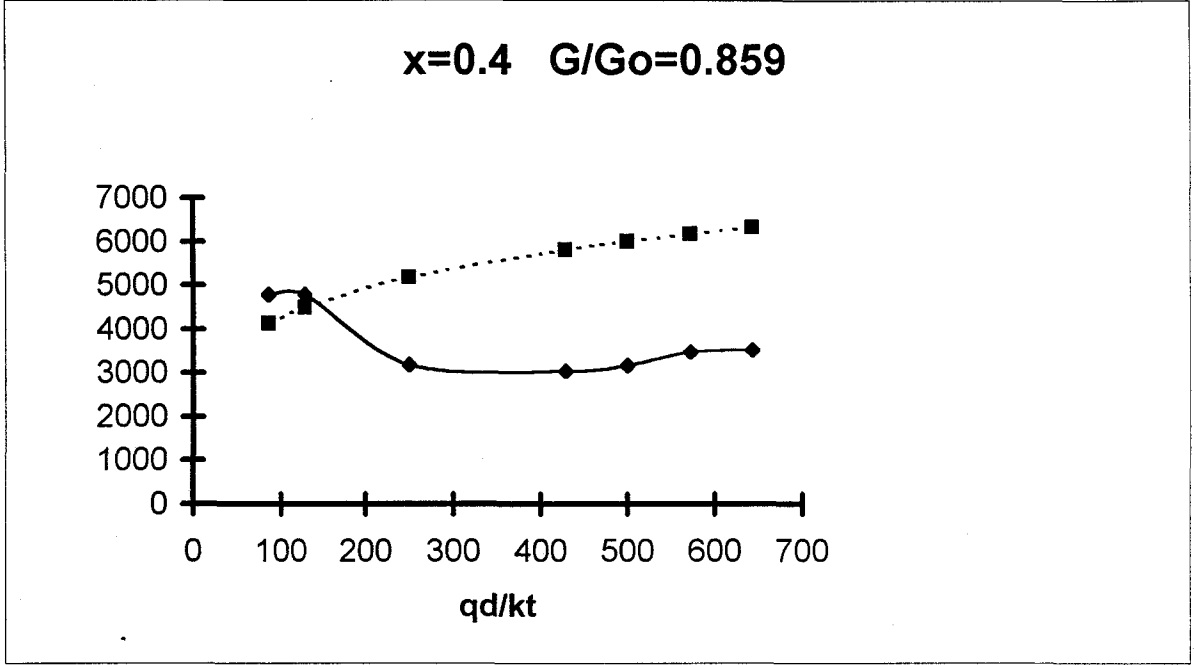
Şekil Ek E.3.1. $x=0.4$ ve $G/G_0=0.234$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



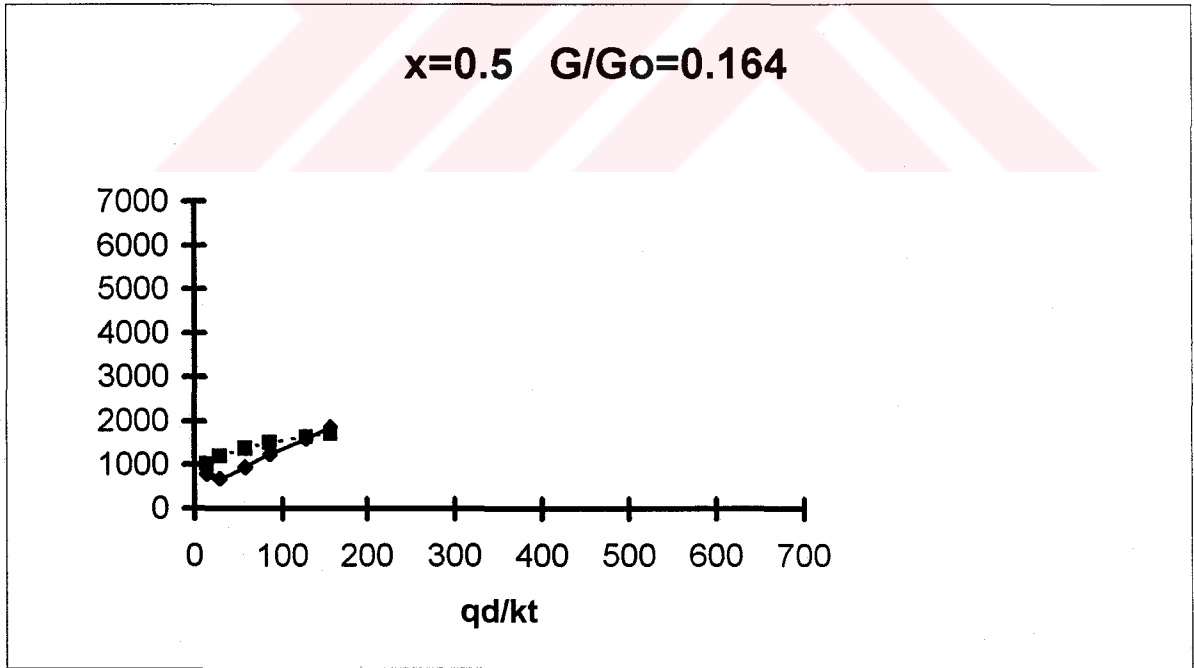
Şekil Ek E.3.2. $x=0.4$ ve $G/Go=0.352$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



Şekil Ek E.3.3. $x=0.4$ ve $G/Go=0.555$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması

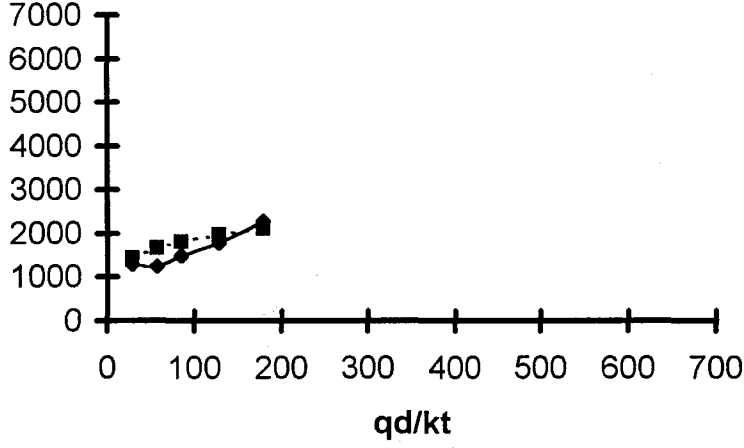


Şekil Ek E.3.4. $x=0.4$ ve $G/Go=0.859$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



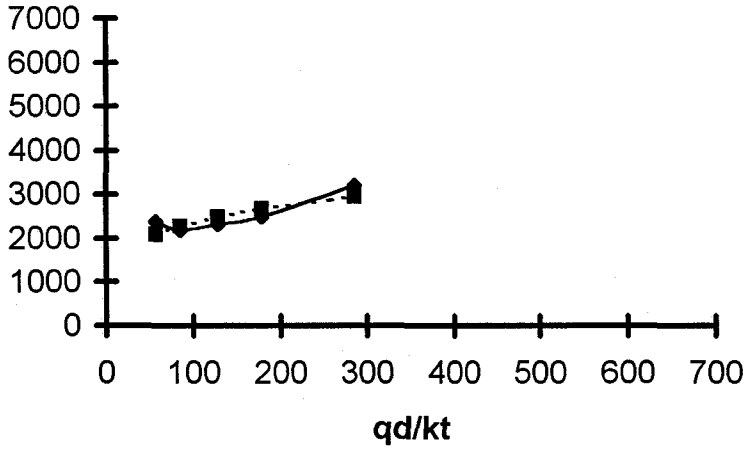
Şekil Ek E.4.1. $x=0.5$ ve $G/Go=0.164$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması

$x=0.5$ $G/Go=0.219$

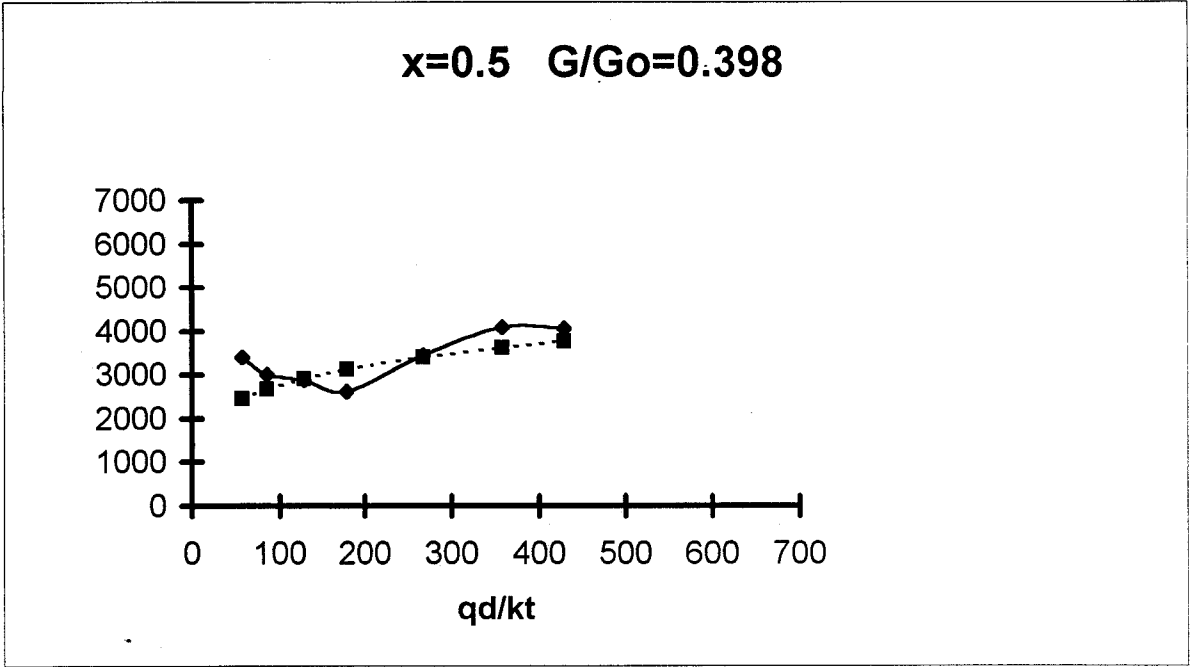


Şekil Ek E.4.2. $x=0.5$ ve $G/Go=0.219$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması

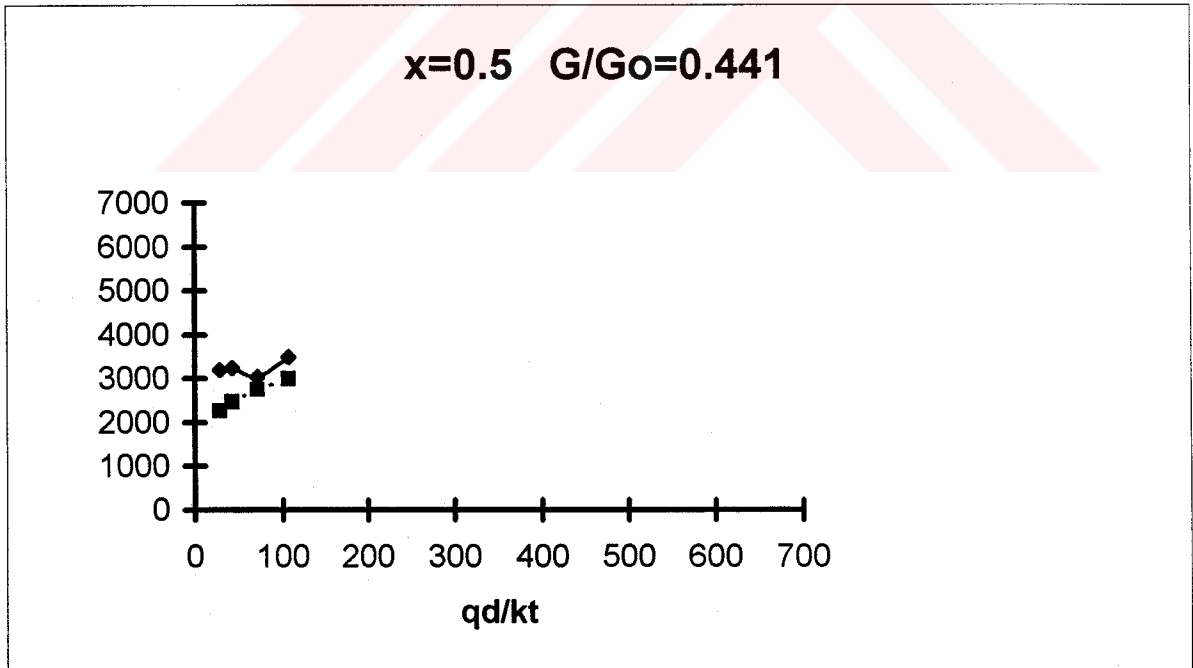
$x=0.5$ $G/Go=0.313$



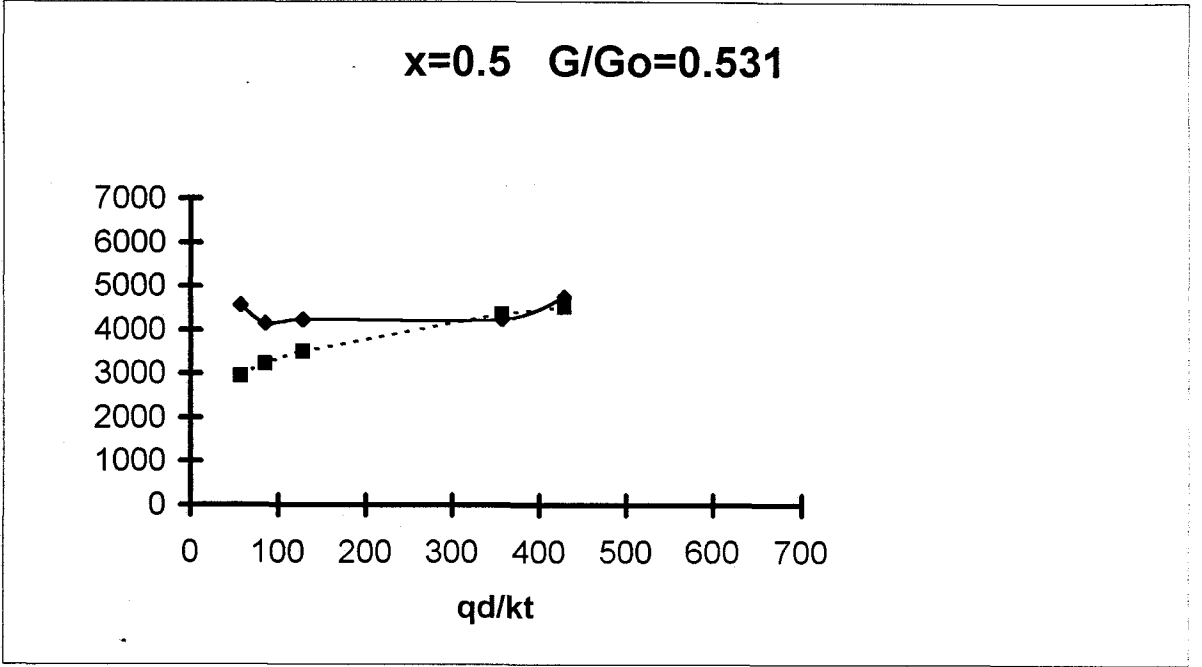
Şekil Ek E.4.3. $x=0.5$ ve $G/Go=0.313$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



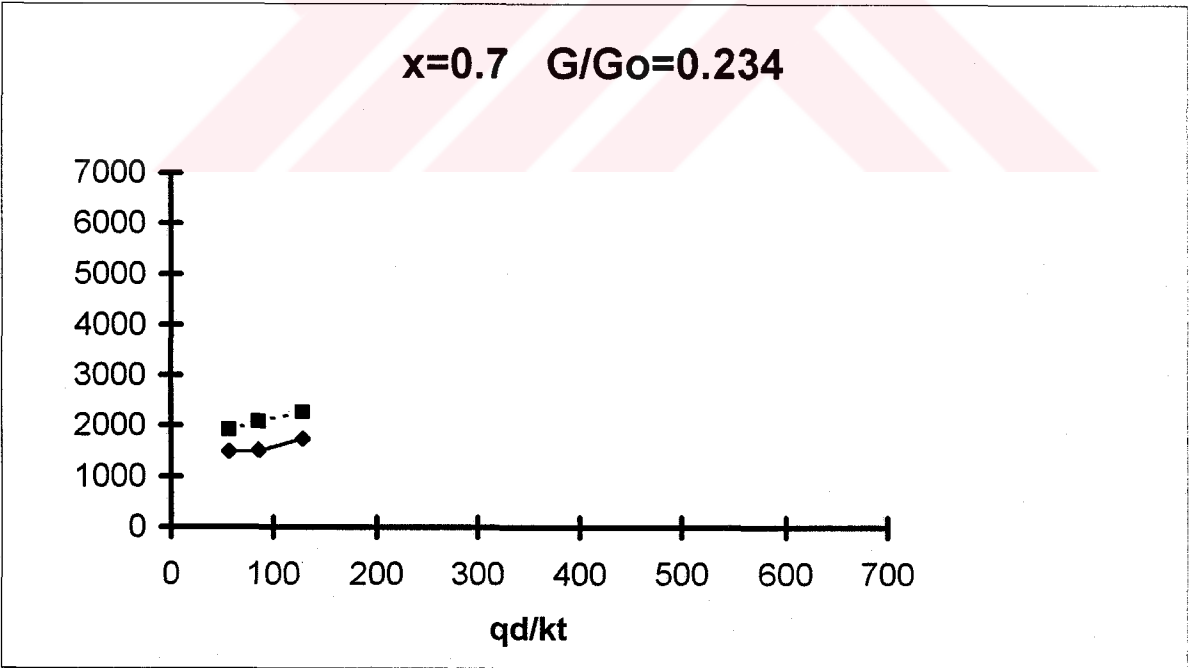
Şekil Ek E.4.4. $x=0.5$ ve $G/G_0=0.398$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



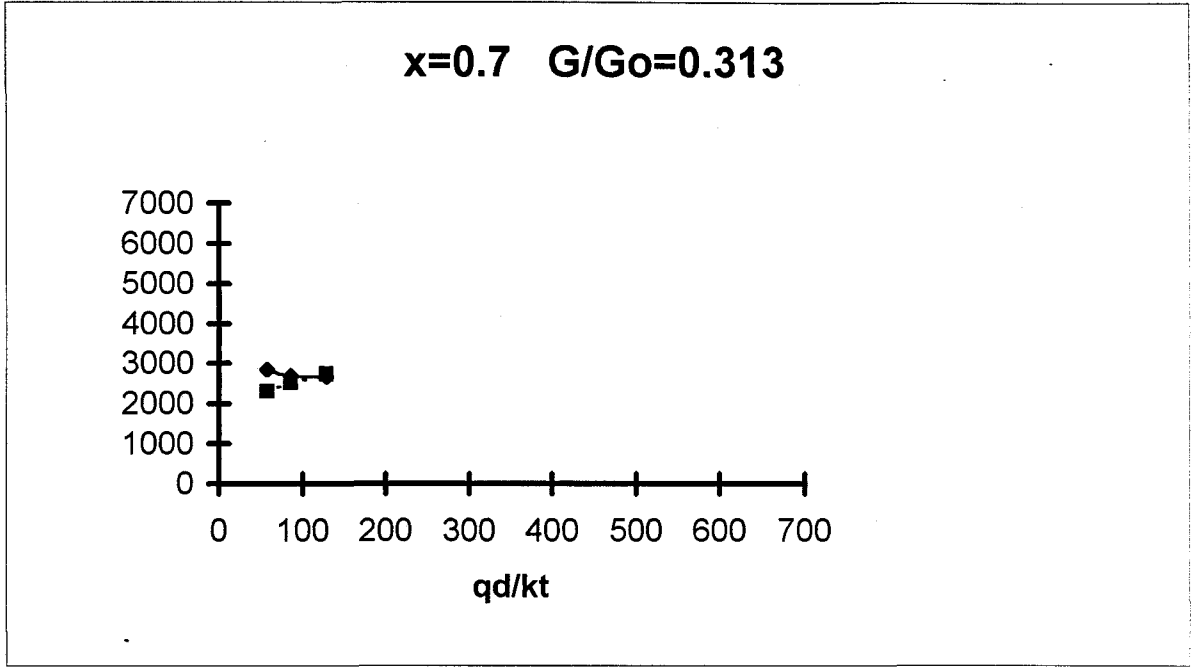
Şekil Ek E.4.5. $x=0.5$ ve $G/G_0=0.441$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



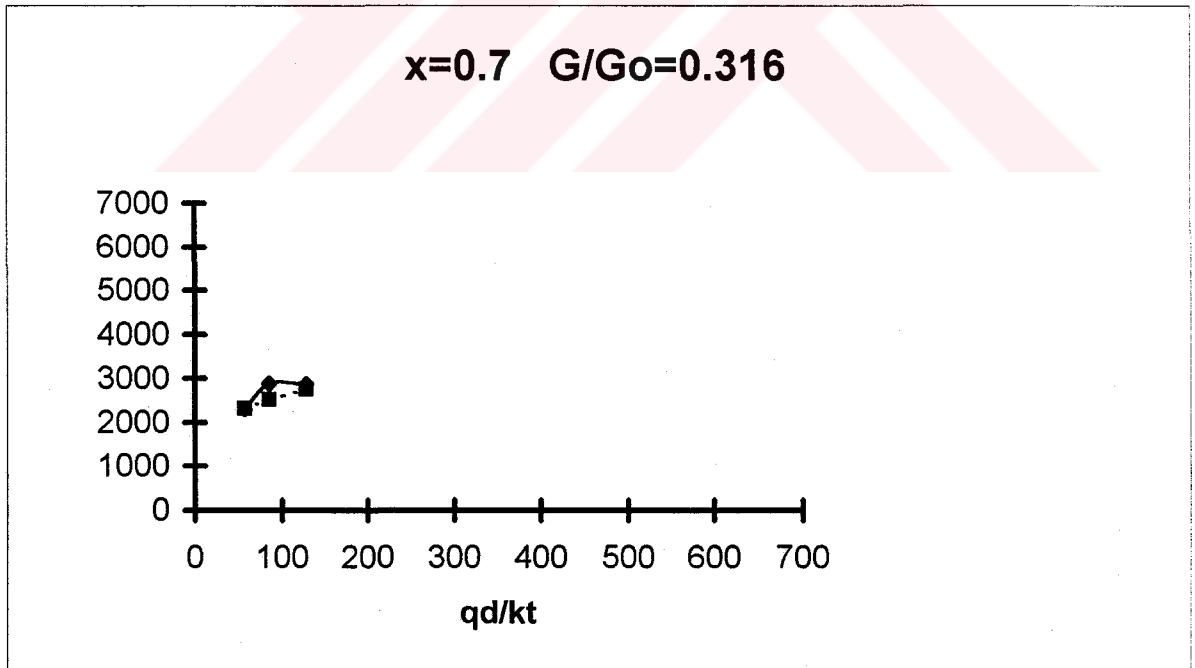
Şekil Ek E.4.6. $x=0.5$ ve $G/Go=0.531$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



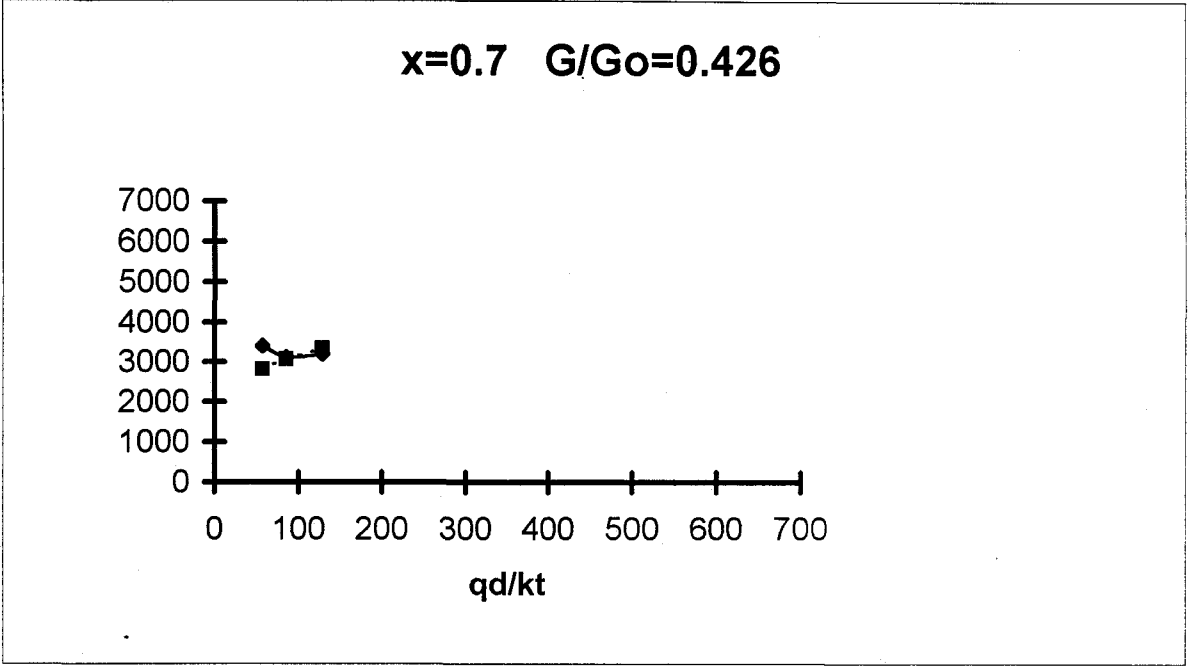
Şekil Ek E.5.1. $x=0.7$ ve $G/Go=0.234$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



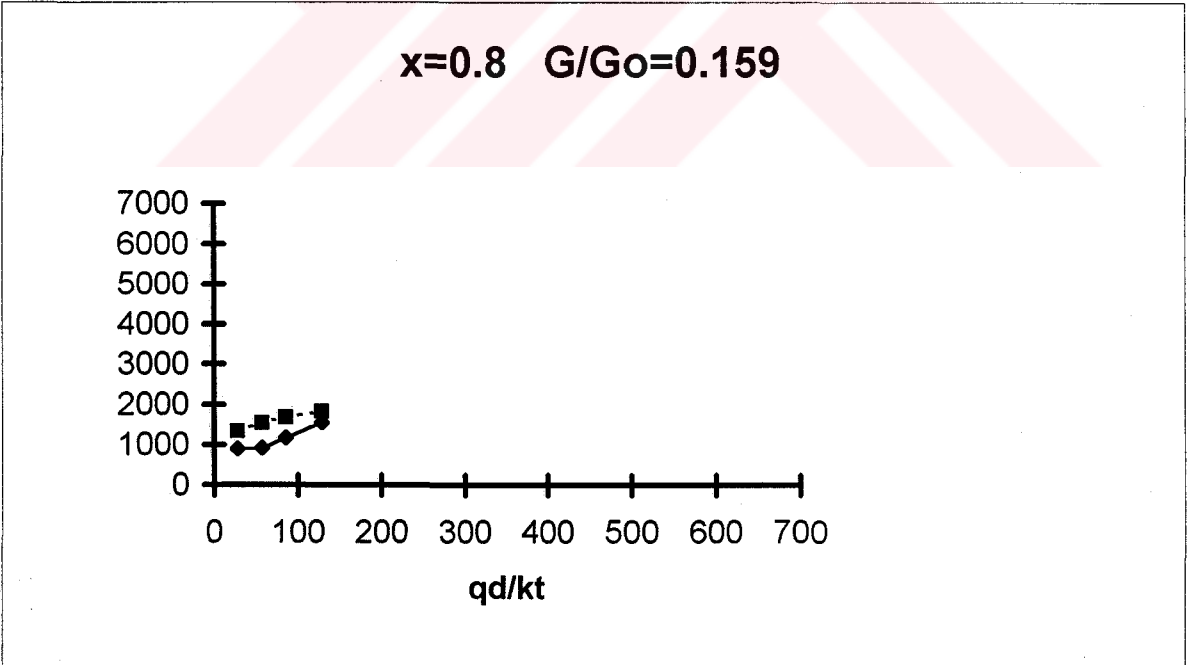
Şekil Ek E.5.2. $x=0.7$ ve $G/G_0=0.313$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



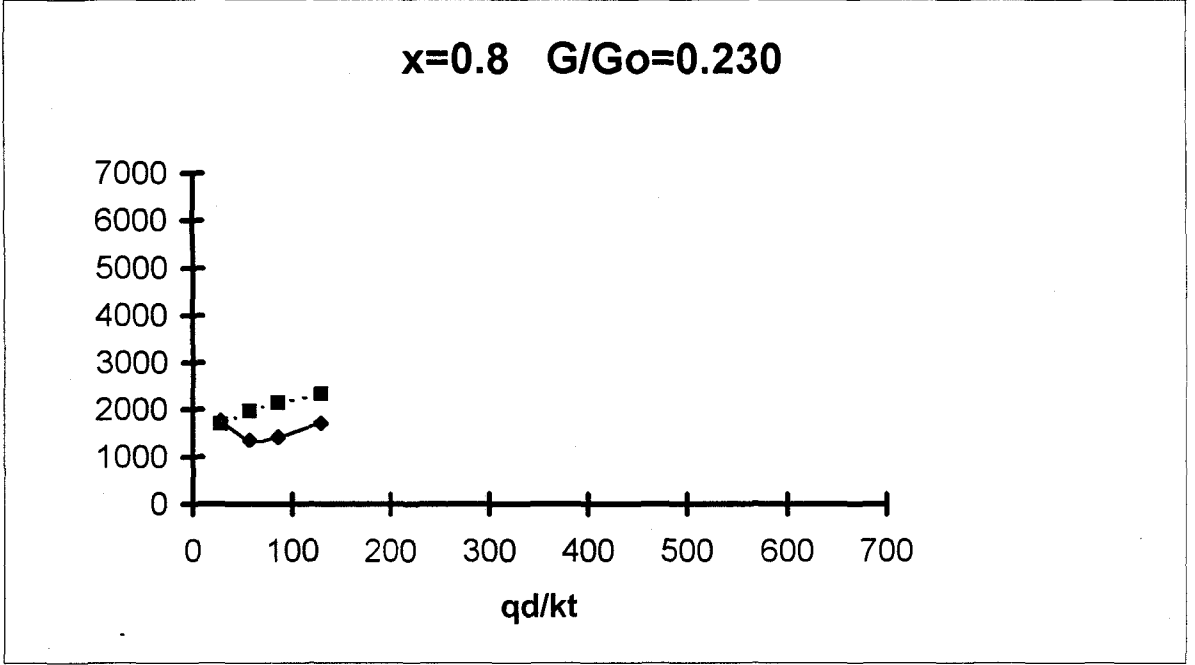
Şekil Ek E.5.3. $x=0.7$ ve $G/G_0=0.316$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



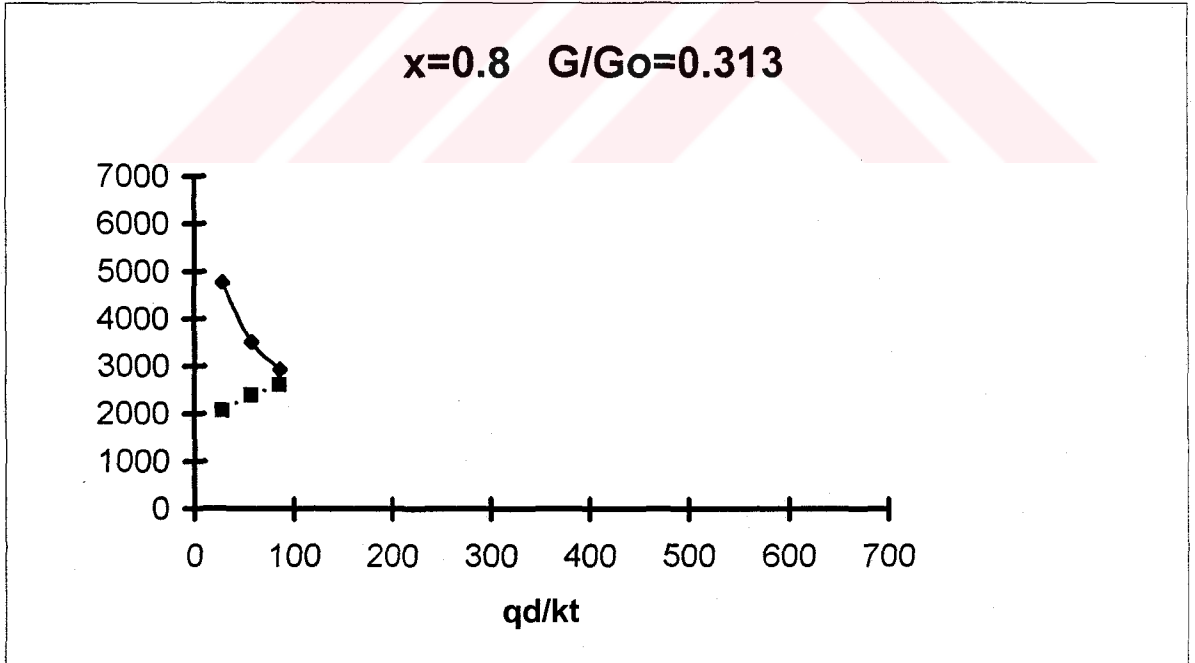
Şekil Ek E.5.4. $x=0.7$ ve $G/G_0=0.426$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



Şekil Ek E.6.1. $x=0.8$ ve $G/G_0=0.159$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



Şekil Ek E.6.2. $x=0.8$ ve $G/G_0=0.230$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması



Şekil Ek E.6.3. $x=0.8$ ve $G/G_0=0.313$ için teorik sonuçlar ile deneysel verilerin karşılaştırması

ÖZGEÇMİŞ

1972 yılında İstanbul'da doğdu. İlk öğrenimini Pilot Cengiz Topel İlkokulu'nda tamamladıktan sonra 1983 yılında İstanbul Lisesi'ne girdi. Bir sene hazırlık olmak üzere toplam 7 senelik eğitim ve öğretimin ardından 1990 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi'ne başladı. Son yılı Enerji ve Isı kollarında olmak üzere 4 yılda mezun olduktan sonra 1994 yılı kış yarıyılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde Enerji programına başladı. 1995 yılı Şubat ayında, halen sürdürdüğü İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Termodinamik ve Isı Tekniği Anabilim Dalı'na bağlı olan Isı Geçişi ve Ekonomisi Birimi'nde araştırma görevlisi kadrosuyla göreve başladı. İleri derecede Almanca ve iyi derecede İngilizce bilmektedir.

